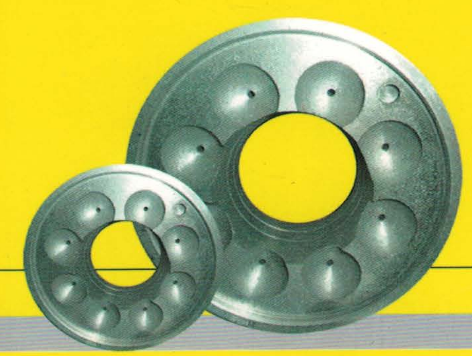


模具材料性能与应用

THE FUNCTION AND APPLICATION OF MOULD MATERIAL



[日] 並木 邦夫 著
高娟 译





日本经典技能系列丛书

模具材料性能与应用

[日] 並木　邦夫　著
高娟　译



机 械 工 业 出 版 社

本书以日本模具材料为例，介绍了模具材料的基础知识与应用。本书内容深入浅出，丰富实用，图文并茂，不但涵盖了模具钢的制造方法，而且涉及其性能、适用范围、热处理工艺及其对模具钢性能改善和强化的效果；同时对模具失效进行了分析并提出了对策，还对模具材料的发展趋势作了阐述；为便于读者学习，还列出了模具钢主要生产国和日本主要厂家的牌号对照表。因此本书不仅是一本入门书，也是一本实用的指导书；不但有理论深度，更有应用实例以及许多经验的总结。

本书不仅可供模具行业的技术人员和一线操作人员使用，也可供大中专院校相关专业师生参考。

序

作者並木邦夫博士现任日本《特殊钢》专业期刊的编辑委员长，多年来在日本大同特殊钢株式会社从事工模具钢的研发和技术服务工作。自 20 世纪 90 年代后期开始，他便通过模展及学会等与我国模具行业有了友好往来，曾邀请中国模具工业协会在日本《特殊钢》杂志上发表文章介绍我国模具行业的发展。

8 年前，为了便于模具行业人员了解及正确选用模具材料，並木先生凭借广泛的学识和丰富的经验，撰写了有关模具材料的入门专著《はじめての金型材》，作为技术入门图书在日本出版，获得了广泛好评。

日本生产的许多工模具钢在我国模具行业已被广泛应用多年。为了帮助我国模具行业人员能更加深入地了解以及正确选用这些模具材料，並木先生希望将此书介绍给我国读者。

在该书中文版《模具材料性能与应用》付梓之际，並木先生请我为之写序，实乃愧不敢当，但盛情难却，于是只好将本书的原委记述于此。

我之所以愿意帮助将此书引入我国，主要是出于四方面考虑。一是从 20 世纪 90 年代开始，我国模具工业发展很快，规模和水平都得到了很大提高，但模具钢的供应一直处于不相适应的状态，甚至可以说模具钢已经成了我国模具工业进一步发展的瓶颈之一。二是在我国国产模具钢的品种、规格、性能、质量以及配套供销等方面存在种种不足的情况下，进口模具钢的品种和数量逐年增多，其中日本大同特殊钢就是典型的品牌之一。三是长期以来，我国模具行业一直存在着如何正确选择好和使用好模具钢的问题，能对这方面提供帮助的有关书籍和资料不多。四是日本既是模具生产大国和强国，也是模具材料生产强国，其中日本大同特殊钢株式会社研制出的许多模具钢具有世

界性影响。相信並木先生的著作一定具有很大的实用价值。

《模具材料性能与应用》从何谓模具开始娓娓道来，深入浅出，内容丰富、实用，图文并茂，不但涵盖了模具钢的制造方法，而且涉及其性能、适用范围、热处理工艺及其对模具钢性能改善和强化的效果；同时对模具失效进行了分析并提出了对策，还对模具材料的发展趋势作了阐述；为便于读者学习，还列出了模具钢主要生产国和日本主要厂家的牌号对照表。因此，这本书不仅是一本入门书，也是一本实用的指导书；不但有理论深度，更有应用实例以及许多经验总结。

最后衷心祝愿该书在我国顺利出版，并能为我国模具工业的发展作出一定的贡献。

周永泰

2014 年 2 月于北京

前　言

从汽车、家电、数码电器到日用品，铁、铝及塑料产品等在我们的生活中随处可见。大量制造这些产品或零部件的成形工具就是模具。对模具的要求主要是在保证高精度的同时发挥其各种功能，并具有较长寿命。用来制作模具的材料就是模具材料。虽然消费者几乎不直接接触它们，但它们才是建造我们多彩生活的“幕后英雄”。

用作模具材料的钢主要是工模具钢，是特殊钢的一种。特殊钢属于钢铁材料，钢铁材料属于铁，铁又归类为金属。人类自石器时代起，经历了青铜器时代，在掌握了铁的应用后进入铁器时代，从而获得了大幅度的发展。人类与其他动物的不同之处在于火和工具的使用，作为工具的模具就是用具，因此在一定意义上来说，模具为人类的发展做出了贡献。

本书于2006年作为面向日本国内初学者的教科书而出版。具有一定专业知识的人员或其他领域的技术人员，通过本书可以温习基础技术及学习新技术。因此本书内容不限于介绍原理，对来自实际应用方面的课题、具体的模具材料、材料的热处理工艺等也作了介绍，并尽可能做到通俗易懂。另外，为方便东南亚国家及一些通用英语国家的模具材料工作者使用，还出版了英文简装版本。因此其读者不仅是大同特殊钢集团的员工，而且包括广大用户们。

承蒙多年从事中国模具行业指导工作的周永泰先生的引荐，得到出版中文版本的机会。中国汽车和家电等产业的发展令人瞩目，模具行业的某些领域已达到国际水准。另外，追溯历史可知，中国曾为日本之师，日本今后也需要与中国进一步加强合作，所以非常高兴能出版中文版本，并对周永泰先生亲自予以审阅指导深表感谢。

本书于2006年出版以来已经过了7年，其中有些统计数据及各模具材料生产厂家的品牌等已经陈旧，因此借此出版机会尽可能对内

容进行了更新修订。

特殊钢与普通钢的不同之处是“含有合金元素，热处理后使用”。作为模具材料使用的工模具钢含有多种合金元素，并进一步利用正火、淬火、回火等热处理工艺来使其特性得到更好的发挥，正可谓是特殊钢中的特殊钢。从这个意义上讲，学习并掌握好作为模具材料使用的模具钢的知识，即可窥一斑而知全豹。对于模具钢的钢种来说，既有各国标准规定的钢种，也有企业钢种。这是因为虽然钢的成分相同，但是厂家通过各自的成分设计和制造方法赋予材料独特的“味道”，并经过长期实践检验而树立良好的信誉，逐渐形成了自己的品牌。因此，本书也根据需要，就 JIS 钢以外的钢种牌号也进行了说明，并列出了主要钢种牌号的对照表。

希望这本拙著的出版，能为增进中日双方模具材料及相关行业工作的交流合作尽微薄之力。

最后，对反复精读原著，为中文版翻译尽力的大同特殊钢株式会社高娟女士表示衷心的感谢。

並木　邦夫

2014 年 1 月于日本东京

目　录

穿插小专栏

- “铁”的语源
- 成为历史遗产的炼钢电炉
- 探索微观世界
- 用研究者名字命名的显微组织
- 浅谈钢种牌号的含义
- 金相组织学的地图——相图
- 埃菲尔铁塔是用钢铁建成的吗?

第1章 何谓模具

说起模具，从汽车、家电到信息产业，可以说它是支撑着这些产业的基础。

然而，影响模具质量和性能的关键因素是模具材料。

本章主要就制造各种产品的模具进行概要说明，并围绕模具产业和模具的变迁以及模具材料的背景加以阐述。

1.1　常用产品的制造方法及其模具

汽车已成为我们日常生活中不可缺少的交通工具。不过，你是否知道汽车是由何种材料构成的呢？不同材料所占汽车质量的比例称为材料构成比率。由图 1-1 可知，汽车是由普通钢、特殊钢、铸铁、有色金属、塑料、其他非金属材料等构成[1]。为降低燃料消耗量，达到汽车的轻量化，铝及塑料的构成比率呈逐渐增加趋势。

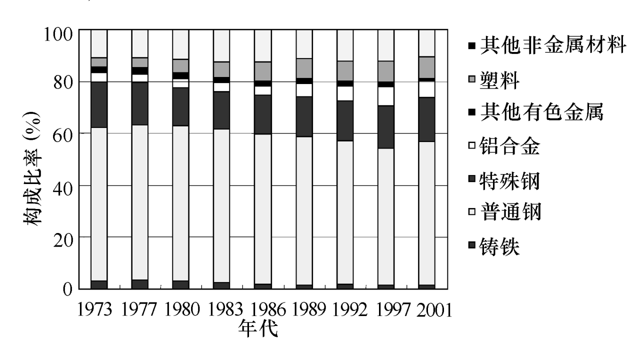


图 1-1　汽车材料的构成比率

注：图 1-1 的近期数据未见发表，为方便理解，以过去数据作为大致构成比率的参考。

将这些材料制造成各种结构件及零部件，靠的就是模具。构成汽车的零部件有底盘、发动机罩、行李箱、车门等，还有提供动力的发动机、传递动力的变速器、与路面接触的轮胎、具有操纵功能的转向盘，以及玻璃制品和内饰件等。制造各个零部件时，虽然所用的成形方法不同，但是几乎都靠模具成形。

那么，各零部件又是用什么材料、如何成形的呢？通过表 1-1 可以发现，底盘和车架主要使用普通钢（低碳轧制钢材），最近也使用高强钢板经冲压成形。在构成发动机的零部件当中，气缸体用铸铁或铝合金，分别经铸造和压铸而成。气缸盖为铝压铸件。连杆和曲轴等采用碳素钢及非调质钢经热锻成形。

表 1-1　汽车零部件的制造工艺及其模具钢

零部件		原材料	制造工艺	模具钢
底盘、框架、车体部件		普通钢	冷冲	冷作模具钢、铸钢
发动机	气缸体	铸铁、铝合金	铸造、压铸	热作模具钢
	气缸盖	铝合金	压铸	热作模具钢
	发动机气门	耐热钢	热锻	热作模具钢
	连杆	碳素钢、非调质钢	热锻	热作模具钢
	曲轴	碳素钢、非调质钢	热锻	热作模具钢
变速器	齿轮	表面淬火钢	热锻、机械加工冷锻	热作模具钢
	轴			超硬合金、冷作模具钢、高速工具钢
驱动部件	等速万向节	碳素钢、表面淬火钢	冷锻、温锻、热锻	热作模具钢、高速工具钢
	转向节	碳素钢、合金钢	热锻	热作模具钢
车窗玻璃		玻璃、塑料	压制	高硬度不锈钢
前照灯		塑料	注射成形	塑料模具钢
内外饰件	仪表盘、保险杠	塑料	注射成形	塑料模具钢
轮毂		普通钢	冷压	冷作模具钢、铸钢
		铝合金	低压铸造	热作模具钢

变速装置及差速器关联的齿轮和轴，一般用表面淬火钢经机械加工制成，不过有时也采用冷锻成形。等速万向节为锻件，且冷锻、温锻、热锻都会用到。汽车保险杠、前照灯、仪表盘及内外饰件等是用塑料经注射成形进行生产的。依此类推，各种零部件正是通过模具成形来实现大批量生产的。

与汽车类似，在我们日常生活中，可以说从早到晚都被家电产品和电子产品包围着。尤其是近几年已逐渐成为必需品的手机、电脑以及电视机等，它们的零部件又是怎样制成的呢？表 1-2 列出了手机、

电脑、电视机零部件的制造方法及其模具材料。其外壳框架大都是由聚碳酸酯等 PC 塑料经注射成形制成的，其中也有使用镁合金和复合材料的零部件。手机按键和计算机的键盘也是塑料制品。

表 1-2　手机、电脑、电视机零部件的制造方法及其模具材料

<table>
<tr><th colspan="2">零　部　件</th><th>原　材　料</th><th>制 造 方 法</th><th>模 具 材 料</th></tr>
<tr><td rowspan="4">手机</td><td>机体</td><td>塑料（PC）</td><td rowspan="4">注射成形</td><td rowspan="4">塑料模具钢</td></tr>
<tr><td>液晶显示器</td><td>塑料（PMMA）</td></tr>
<tr><td>相机镜头</td><td>塑料（COP，PC）</td></tr>
<tr><td>按键</td><td>塑料（PC）</td></tr>
<tr><td rowspan="3">电脑</td><td>机体</td><td>塑料（PC）
镁合金</td><td>注射成形
压铸</td><td>塑料模具钢
热作模具钢</td></tr>
<tr><td>液晶显示器</td><td>塑料（PMMA，PC）</td><td rowspan="2">注射成形</td><td rowspan="2">塑料模具钢</td></tr>
<tr><td>键盘</td><td>塑料（ABS）</td></tr>
<tr><td rowspan="2">电视机</td><td>机体</td><td>塑料（ABS 及其他）
铝材</td><td>注射成形
压铸</td><td>塑料模具钢
热作模具钢</td></tr>
<tr><td>液晶显示器</td><td>塑料（PMMA，PC）</td><td>注射成形</td><td>塑料模具钢</td></tr>
</table>

手机的液晶显示器（导光板）是用亚克力（丙烯酸酯）塑料经超镜面模具成形而成的。至于电视机的机体，既有经压铸成形的铝合金制品，也有通过注射成形的塑料制品。另外，被称为电脑媒体的 CD 和 DVD 等产品的主要零部件，也是利用超镜面模具将塑料成形而制成的。

此外，汽车内部安装的一些箱盖、小齿轮及插接器等，许多也是塑料制品。

以汽车、家电产品及电子产品为例，对其成形方法进行分析后可以发现，除了一部分是靠机械加工的以外，大部分是靠模具成形制成的。

除此之外，日常生活中我们经常接触到的产品，其大多数的生产过程也同样离不开模具。当然，我们使用的东西肯定已经是最终产品，而用于生产产品的模具，以及用于制造模具的材料，才是真正的

幕后英雄。

1.2 模具的定义

那么，模具到底是什么呢？具有代表性的日语大辞典《広辞苑》[2]给出了三种解释：①用于锻造的模具，由上下两模组成，使用特殊钢材料，将锻件上下分割后，按其相反形状（凹模）加工而成；②用金属制成的铸模，当铸件的形状精度要求较高及制件数量较多时使用；③用于塑料成形的金属模。

虽然这是通用辞典的解释，但所言几乎都涉及技术性内容。为了充分理解模具的含义，对其进行技术性的补充后归纳如下：

① 用金属制成，所用金属是特殊钢，即工模具钢。

② 加工成与所需产品形状相反的形状，在此形状的模具中放入产品材料并使之成形。

③ 在制件数量较多时使用。

在此，根据成形时的产品材料状态又可分为两种情况。《広辞苑》中释义①的产品材料状态是固体，释义②和③是熔融状态的铁和塑料。虽然在日语当中统称为“金属模具”，但是在英语中将固体成形称为 Die，将熔融材料成形称为 Mold，两者是有所区别的。例如，英语中锻造模是 Forging Die，压铸模是 Die Cast Mold，塑料注射成形模是 Injection Mold。

对于不同产品，就像汽车零部件所列举的那样，涉及普通钢、特殊钢、有色金属、非金属材料等诸多方面，加之其成形温度也从常温到高温不等，因此对模具材料也有多方面的要求。本书将针对这些模具材料，逐一进行说明。

1.3 产品的成形方法与模具

模具可从成形方法、结构、成形温度和加工对象的材料等不同角度进行分类。从成形方法及加工对象的材料对模具进行分类，如图 1-2

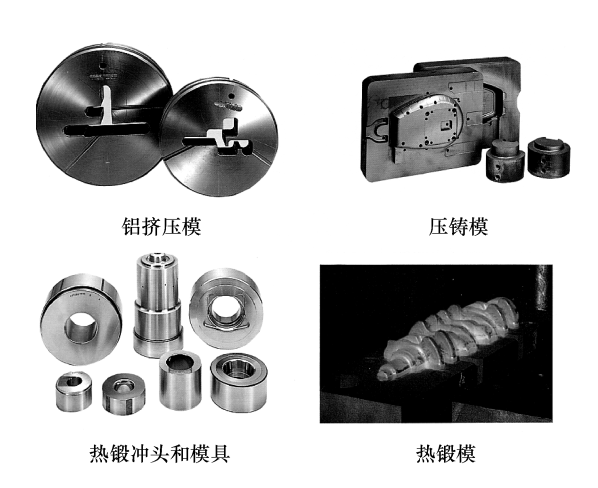
所示，主要是按钢和铝合金的成形方法分成冲压、锻造、挤压、铸造、压铸模具。另外，根据加工对象材料的不同可分为塑料、粉末冶金、玻璃、橡胶模具等。对于冲压模，根据加工对象材料的变形机理不同，还可分为成形模、弯曲模、拉深模、冲裁（剪切）模及压缩加工模等。铸造可分为重力铸造、低压铸造和失蜡铸造等，压铸又可分为挤压铸造及真空压铸。塑料一般是注射成形，但有些产品需要用到压缩成形、挤压成形和吹塑成形等。具有代表性的成形模具实例如图 1-3 所示。

钢和铝合金	冲　压	·热冲　·冷冲 ·冲裁　·弯曲 ·成形 ·拉深 ·压缩
	锻　造	·冷锻　·温锻　·热锻
	挤　压	·冷挤压　·热挤压
	铸　造	·重力铸造·低压铸造·失蜡铸造·壳型铸造
	压　铸	·高压 ·挤压 ·真空
其他材料	塑　料	·注射成形 ·压缩　·挤压　·吹塑
	粉末冶金	·压缩
	其　他	·玻璃成形·橡胶成形·陶瓷成形

图 1-2　从成形方法及加工对象的材料对模具进行分类



图 1-3　成形模具实例



b) 热作成形模具实例

图 1-3　成形模具实例 （续）

根据影响模具选材的成形温度不同可分为冷作模具和热作模具。根据加工对象材料的加热温度来看，铝合金和镁合金的压铸模、铸造模、热锻模，还有玻璃模等均属于热作成形模具。另外，锻造有冷锻（常温）和热锻（再结晶温度以上，通常为 1000 ~ 1200℃），在两者中间为温锻，如图 1-4 所示。

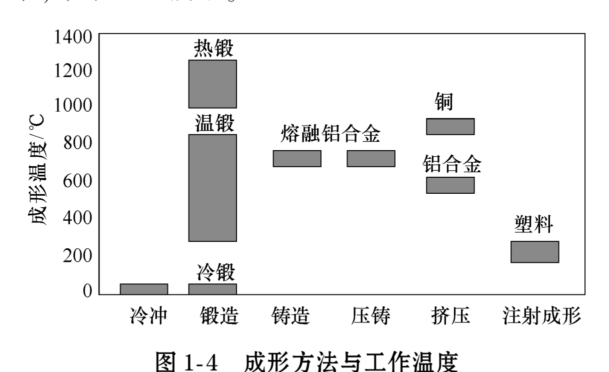


图 1-4　成形方法与工作温度

根据各种模具的结构，将直接接触加工对象材料并承受载荷的内模件与模座和模具配件区分开来。通常模具材料用于内模件，而模具

配件则主要使用低碳钢、碳素钢及结构钢等制作。关于用于模具的模具材料，将在第 4 章进行较为详细的介绍。

另外，有关各种模具的结构及原理，在本系列入门丛书中的《最初的模具技术》[3] 中有详细介绍，请予以参考。

1.4　模具产业的发展趋势

1.4.1　模具产业的变迁

本节主要介绍模具产业的变迁及当前状况。图 1-5 所示为近 50 年来，日本主要产业的发展与模具产业的变迁。模具产业的 70% 与汽车和家电产业有关。伴随着这些产业的进步，模具产业也随之发展起来。虽然第二次世界大战过后，汽车对平民百姓来说还是高不可攀的奢侈品，冰箱、洗衣机、黑白电视机也曾被称作“三大件”，但都随着经济的高度增长，家庭普及率显著增加。

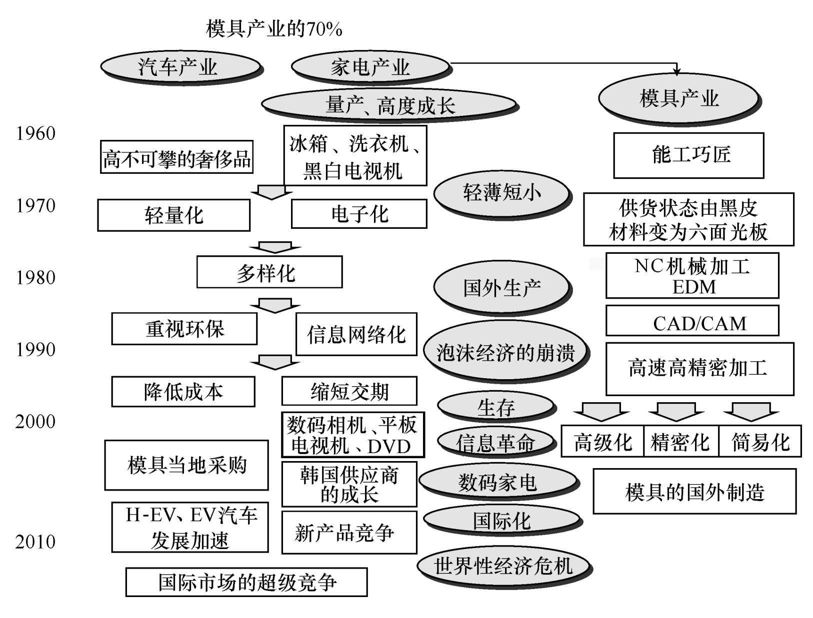


图 1-5　日本主要产业的发展与模具产业的变迁

其后，随着电子工业的进一步发展，汽车和家电产业经历了注重“轻薄短小”的袖珍阶段，步入了多样化时期。在这一阶段，为减少贸易摩擦，依赖于出口的汽车、家电的生产基地开始向国外转移。另外，由于全球变暖和环境问题被提到议事日程上来，这一时期注重应对汽车排放限制和轻型化。同时，在模具制造方面，信息网络化也得到了发展。

接下来，经历了泡沫经济时期。1989 年泡沫经济崩溃后，各行各业为了生存不得不采取严格措施，在降低成本、缩短交期等方面进行重整和改革。另一方面，称为 IT 革命的新“三大件”——数码相机、手机、电脑等数码产品有了大幅度增长。尤其是此类产品更新换代快、上市间隔日趋缩短，导致其使用周期也不断缩短，这些都是它们的共同点。

目前，为了进一步降低成本，以东南亚和中国为中心的海外生产规模逐渐扩大，当地的模具生产水平也在逐步提高。这期间遭遇 2008 年全球金融危机，还有日元升值对出口竞争力的削弱，都进一步促进了模具的海外生产及当地采购的形成。

在主要产业的这些变迁之中，20 世纪 60 年代之前模具产业还主要依靠擅长传统技能的工匠。而后，模具材料的供应从黑皮材料发展到六面加工板材等，加工深度增加。如图 1-6 所示，在模具的流通过程中，与以往的供应黑皮材料相比，如今已采用加工成白皮材料及标准件的白皮平板材，或进一步钻孔及粗加工等，这些已在材料加工厂家中达成共识。以往多是委托专业热处理厂家进行热处理，后来材料销售商自己设立热处理部门的比例逐渐增加。在流通阶段的这些变化，大大缩短了用户的模具制作周期。

模具加工方面采用了数控机床及电火花加工机床，同时 CAD/CAM 技术也得到了普及，从设计阶段到试模再到量产同步进行，大幅度缩短了工期。并行工程（Concurrent Engineering）顺理成章地被广泛推广。切削加工设备也通过改善刚性和热稳定性，在高速、高精度化方面有了显著进步。

从目前来看，以数码家电为主的产品使用周期极为短暂，单件模

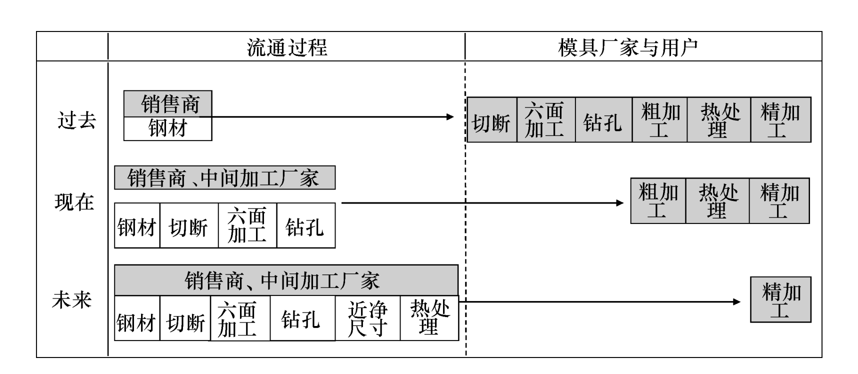


图 1-6　模具的流通与生产过程

具的生产量减少，呈现多品种及小批量生产的趋势。因此，要求模具不仅能生产出好的产品，其本身也要快捷价廉，这已成为当务之急。因此，对模具材料方面，也更加注重改善质量（Quality）、成本（Cost）及交货期（Delivery）。

1.4.2　模具产值

主要模具产值如图 1-7[3,4] 所示。该数据是在模具制作企业覆盖率较高的工业统计的基础上，将调查频次较高的机械统计数据补充后进行汇总而得到的。1991 年模具产值曾接近 2 万亿日元，但因泡沫经济的崩溃而骤减；其后虽在 1997 年有所复苏，但仍然长期持续低迷；2004 年、2005 年虽然有了较大恢复，但在 2008 年全球金融危机影响下又大幅度下滑；随后虽然在 2010 年转为增长趋势，不过受日元升值及模具海外生产的影响，2012 年只达到最好年景的七成。

模具之间相比，塑料模具与冲压模具相近并显示出最大产值。在后面的章节将会具体介绍，塑料模具的产值比率高于塑料模具材料的金额比率是由于前者的附加值较高。

图 1-8 所示为日本国内工模具钢的需求量[5]。受销售商库存的影响，工模具钢的需求量与模具产值的变化情况不一定完全对应，但两者的整体趋势是一致的。

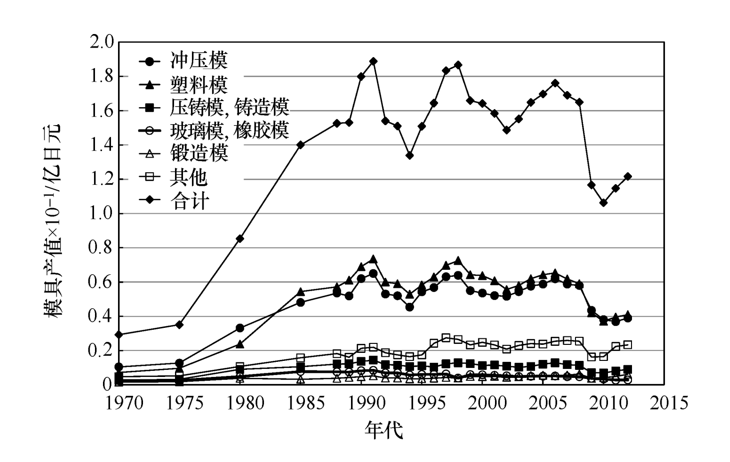


图 1-7　主要模具产值

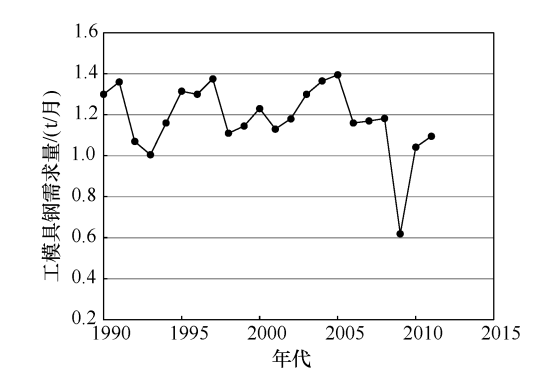


图 1-8　日本国内工模具钢的需求量

图 1-9 所示为工模具钢[6]与用途分类（推定）。日本国内 2003—2005 年工模具钢的使用量为 13000 ~ 14000t/月。其中包括碳素工具钢、特殊工具钢、冷作模具钢的冷作工具钢最多，其次为包括热锻模具钢和热作模具钢的热作工具钢，再次为塑料模具钢和高速工具钢。还有，冷作模具钢和热作模具钢几乎相等，各占 1/4。

从工模具钢的用途来看，汽车占到 41%，电机家电为 23%，产业机械为 28%。再进一步按各钢种群的用途来看，冷作模具钢在汽

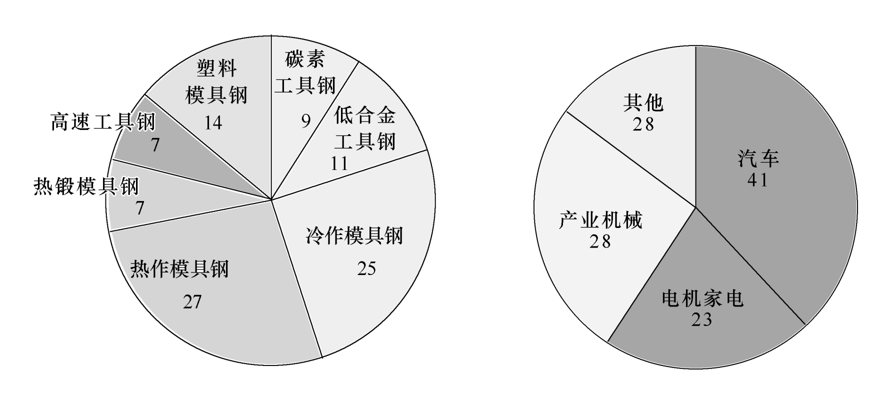


图 1-9　工模具钢与用途分类

注：2004 年数据，生产量为 13800t/月。

车和电机家电的应用各占 33%。热作模具钢在以压铸和锻造为主体的汽车产业应用超过 50%。另一方面，塑料模在汽车和电机家电应用的比例各为 40%，合计占 80%。总之，工模具钢的最大用户是汽车和电机家电产业。

1.5　模具的制作过程与模具材料的重要性

模具的制作过程如图 1-10 所示。一般来说，确定模具规格后，先进行模具设计、材料采购，然后进行粗加工、热处理、放电加工、精整加工、试模，并根据需要进行表面处理。这里的粗加工既有机械加工也有电火花加工。另外，如果材料是可省略热处理的预硬模具钢，则在粗加工后不进行热处理而直接进行精加工后即可交付使用。那么，按此制作过程来看，模具材料占模具制作费用的比例是多少呢？虽然因模具类型有所差异，但大约为 15%。由此可见，模具的加工成本占总制作成本的比重很高，技术含量较高。

另外，模具材料决定着模具的完善程度和使用性能。尤其是塑料模具等，在产品成形表面（外观设计面）上常需要磨成镜面或蚀纹，如果模具材料有质量问题，会造成最终产品为不合格品，若不能修

淬火回火钢

粗加工 ⇨ 热处理 ⇨ 放电加工 ⇨ 精整加工 ⇨ 试模 ⇨ 表面处理

预硬模具钢

粗加工 ⇨ 放电加工 ⇨ 精整加工 ⇨ 试模 ⇨ 表面处理

图 1-10　模具的制作过程

复，还要返工。这样不仅会增加成本，而且会拖延制作工期。再有，一旦产品在使用中出现开裂、崩角或磨损现象，致使寿命远小于设计寿命，就更需要采取紧急措施。

因此，虽然模具材料的费用只占总成本的 15%，但它决定着模具的整体价值，因此应慎重地选用最合适的材料。另外，根据模具用途的不同，即使选用高质量的模具材料会增加成本，但在综合考虑成本后也可能会降低成本。总而言之，模具材料的选用非常重要。

参 考 文 献

[1]（社）日本自動車工業会，日本の自動車工業 2003（2003）
[2] 新村出編：広辞苑（岩波書店）
[3] 松岡甫篁，小松道男：はじめての金型技術，工業調査会（2001）
[4] 経済産業省：平成 22 年工業統計表から推定
[5] 経済産業省：平成 24 年機械統計
[6]（社）日本鉄鋼連盟：自主統計，2004 ~ 2006 年

专栏1

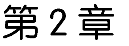
“铁”的语源

说到模具钢，恐怕离不开“铁”。不过其语源并不那么简单。英语的 iron 来自拉丁语的 aes（原为铜或青铜之意）；德语的 Eisen 据说是因为铁的光泽近似于水（Eis）而得名。

铁元素符号 Fe，传说是取自拉丁语中表示“硬”和“坚固”之意的 firmus 的派生词 ferrum。日本铁钢协会的启蒙月刊杂志就是以 ferrum 的读音“**ふぇらむ**”命名的。

铁的坚固和坚硬之意也常被作为形容词引用。比如形容坚强不屈之意的“铁的意志”，还有比喻冷战时期之冷的“铁幕”一词等。英国原首相撒切尔（Thatcher）的“铁娘子（Iron Lady）”绰号让人印象深刻。从铁制品来说，常用的有熨衣服的熨斗及打高尔夫球的铁头球杆等。

另外，从19世纪中叶开始发展起来的美国著名钢铁城市匹兹堡（Pittsburgh）有冠以“钢铁城（Iron City）”品牌的当地啤酒，还有老牌橄榄球队 Pittsburgh 也被封以“钢人队（Steelers）”的绰号。



第2章

模具与模具材料的历史

模具就是用金属做成的模子，是可供反复生产同一种制品的工具。

那么，模具的起源要追溯到何时呢?用于模具的铁和工模具钢的历史又是怎样的呢?

在讨论模具材料之前，不妨先对其历史加以回顾。

2.1 铁的历史

2.1.1 金属的问世

模具是由金属制成的模子，这在第 1 章中已有所阐述。说是金属，实际上特殊钢中的工模具钢，简而言之就是钢几乎占了其主要部分。然而，钢又属于铁的范畴。钢铁的分类如图 2-1 所示。铁又分为铸铁和钢，这主要是以含碳量的不同来区分的。生铁是用矿石经高炉炼制而成的，含有大量的碳。生铁经浇注成为铸铁。从很早开始，被用于做成铁瓶和锅的材料即为铸铁。

通过向生铁中加入氧来除去碳，将碳的质量分数降至 1.0% ~ 1.7% 便可得到钢。钢又分为普通钢和特殊钢，特殊钢当中包括了用作模具材料的工模具钢。

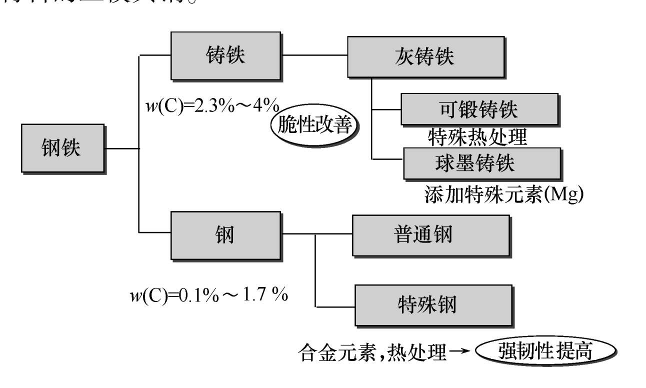


图 2-1 钢铁的分类

那么，铁与人类的关系可追溯到何时呢？常说人类与动物的最大不同在于火的使用。目前尚不清楚人类是如何偶然发现火的，据说是来自火山及天然气的喷发或是山火，然后渐渐发展到钻木取火。

再有，使用各种用具也是人类的特点。用于制作用具的用具即是工具。人类从单是选用自然界既存之物作为工具的阶段，进步到人为

制作各种工具的阶段。例如，最初只是将石头砸碎来磨成石器，到后来将金属进行锻造、铸造，以至逐渐发展到当今的形式。

对于人类来说，最初接触到的金属是以天然光泽引人注目的金。由于金块容易敲打变形，其相关加工技术似乎远在从矿石中提炼金属之前就已非常成熟。

后来随着铜及属于铜合金的青铜的发现，使金属的应用技术有了飞跃性的发展。据说 Metal（金属）一词的希腊语[1]原意为“寻找”。这意味着当时金属是稀有之物，因此被用来制成装饰物之类的奢侈品。随后，人们掌握了铜块加热软化后容易锤打变形的知识，并进一步发展到将铜矿石还原精炼成熔融状态后浇注成形。反映古希腊青铜铸造情景的画面如图 2-2 所示[2]。



图 2-2　古希腊青铜铸造情景的画面

2.1.2　铁的问世

那么，铁与人类是怎样相遇的呢？那是来自宇宙的礼物，称之为陨石的自然铁，据说发生在公元前 5000 年—公元前 3000 年之际。在公元前 3000 年建造的埃及金字塔中曾发现过铁环首饰[3]。可以设想，当时曾将陨石像铜一样加热锤打，待其成形后作为用具使用。还有从胡夫金字塔的石缝中发现了被认为是人造的铁片，可推测在金字塔建筑上也使用了铁[4]。

由于最初从矿石中提炼的铁是制金过程的副产物，所以可认为比

金还稀少。到了公元前2000年，炼制铜时得到还原的铁被当做副产品。公元前1500年，在相当于现今中东土耳其一带存在的赫梯古王国，炼铁技术较为发达。他们炼制的铁，碳的质量分数在0.04%以下，近似纯铁，只是由于无法向炉内送风，未达到一定温度，没能达到熔化状态，最后在固体还原状态经反复锻打，制成锻铁。据说该技术从赫梯古王国传到如今的中东地区。公元前900年，该技术流传到希腊，到了公元前500年已流传到如今英国所在的不列颠地区。被认为是反映公元前400年时希腊锻造情景的画面如图2-3[5]所示。连同前述青铜铸造画面，也许会帮助我们想象出当时人们劳作的情形。



图2-3　古希腊锻造情景的画面

可称为最古老的古代史书《圣经》中，也可找到介绍铁的文字。据说《旧约》全书著于公元前5世纪到公元90年之间，其中有关铁的文字约有87处[4]。不过，金、银、青铜的文字分别有282、266、155处，相比之下可了解到铁在这个时代所处的地位。

公元前1500年前后，这些技术随着雅利安人的移居传到了印度。到了公元400年，据说当时印度已达到了与小亚细亚和欧洲同样的技术水平。先在手动送风的黏土炉中加热木炭和矿石，通过低温还原得到海绵状块体，将它们砸碎细化后与木炭一起装到直径约50mm的圆

锥形黏土坩埚中，密封后经数小时的送风加热使之熔化[6]。

其后得到了碳的质量分数为 1% ~1.6% 的铁块，被称为乌兹钢。古希腊哲学家亚里士多德曾记述乌兹钢的制造始于公元前 350 年前后[6]。到了中世纪，乌兹钢还被出口到中东，用来制作以漂亮花纹闻名的大马士革刀。

中国也被认为从公元前 1400 年前后就开始利用陨铁了，在公元前 8 世纪的下半叶开始使用锻铁，公元前 200 年已经有了高炉能够制造铸铁。依此所述，在世界各地与陨石相遇的人类，早在公元前就以各种形式开始了铁的制造。

2.1.3 欧洲炼铁的进步[3,6,7]

其后，铁的发展历史虽然经历了漫长的暗淡时期，但进入了中世纪，欧洲的各种炼钢法相继显露头角。15 世纪前半叶，高炉在德国的锡根（Siegen）问世，并伴随精炼技术的进步，到了 1740 年，亨茨曼（B. Huntsman）发明了坩埚炼钢法。

坩埚炼钢法是先把铁和木炭混在一起加热得到渗碳钢，再将渗碳钢装到坩埚里通过焦炭炉经高温加热制造出均质钢的方法。制品纵向无接头痕迹及纹路，实现了均匀加热。锻打对这种钢同样适用。这一方法经进一步发展，使含碳量变为可控，形成了特殊钢制造的基本模式。

另外，1783 年，亨利·寇特（Henry Coat）发明了用燃煤反射炉加热生铁，在半熔融状态用叫做 Puddling 的铁棒搅拌，使碳燃烧除去杂质而得到锻铁的搅炼法。

其后在 1760—1830 年间，詹姆斯·瓦特发明了蒸汽机，出现了工业革命，机械加工技术和炼铁技术有了很大进步。英国因此步上了繁荣之道，炼钢技术也在英国得到了确立。

在 1856 年，亨利·贝塞麦（Henry Bessemer）发明了只需向熔融生铁中通风即可使钢发生变化的划时代的转炉法。再有，威廉·西门子（William Siemens）发现让空气和可燃气在蓄热室燃烧可达到更高温度，与法国的皮埃尔·马丁斯（Piere Martins）共同发明了平炉法。

不过，因为这时得到的生铁含磷（P）量较高，应用上还存在问题。解决该问题的是托马斯（Sydney Girchrist Thomas），他利用白云石和焦油的碱性转炉于1879年成功脱磷，确立了碱性炼钢法。在此之后，贝塞麦转炉炼钢法与西门子平炉炼钢法逐渐成了炼钢法的主流。

2.2 工模具钢的历史

2.2.1 合金钢的问世

那么，用于模具的工模具钢的发展又是怎样的呢？在英国的谢菲尔德地区，人们曾经用坩埚炼钢法制造出过工模具钢，但都是碳素钢，不过可将它们的含碳量按用途加以改变。现在用作模具材料的工模具钢中含有多种合金元素，驾驭合金元素的过程也就是工模具钢发展的历史。

历史要追溯到发现电磁感应现象的法拉第。1813年，英国对乌兹钢格外重视，英国皇家研究所对其优异性进行了研究，目的在于开发出更加出色的刀具用钢。受此委托的正是迈克尔·法拉第（Michael Faraday）[7,8]。他从1818年到1823年从事合金钢的研究，想通过合金钢来再现乌兹钢制大马士革刀上的花纹。据说他用20种元素及其组合调制了79种合金，并以凝固时的结晶化为要点进行了研究，但尚未达到充分的结论就转到了电磁学的研究。

2.2.2 向实用钢的进化

在此之后的大约有100年间，没有新的合金钢的研究成果问世。进入20世纪后，法拉第被锰（Mn）钢发明者哈德菲德（Sir Robert Hadfield）称为“合金钢的创始者”，受到了重新评价。在法拉第之后，经过许多研究者的努力，铬（Cr）、钨（W）、锆（Zr）、铌（Nb）、钒（V）、锰（Mn）等合金元素相继被发现，几种具有实用性的钢种也前后得到开发[3]。

后来到了1868年，罗伯特·墨希特（Robert Mushets）发明了8%

W 合金钢，被称为墨希特钢。这种钢加热后只需放在空气中冷却即可硬化，也就是所谓的自硬钢。后来证实，真正起作用的实际上不是 W 而是 Mn 和 Cr 等其他元素。

通常所指的墨希特钢是指 2% C-2.5% Mn-7% W 钢，被认为是最早的合金工具钢。其后人们还开发出了以 Cr 代替部分 Mn 的 Cr-W 自硬钢。

后来，人们对墨希特钢及其他自硬钢进行了切削性能试验。美国的 F. W. 泰勒（F. W. Taylor）和 M. 怀特（M. White）发现用高温热处理（大大高出通常淬火温度的高温淬火）会提高其热硬性（高温时的硬度）。在寻找适用于该热处理的合金钢的过程中，终于发明了高速工具钢（简称高速钢）。

高速工具钢在 1900 年的巴黎世界博览会上由伯利恒钢铁公司（Bethlehem Steel Co.）展出并获得了极大关注，这就是高速工具钢诞生的过程。当时高速工具钢的组成为 1.85% C-3.8% Cr-8% W。到了 1910 年，代表 W 系高速工具钢主流的 18-4-1 系高速工具钢（0.75% C-18% W-4% Cr-1% V）被研制成功。其后，又有改善热硬性的 Co 添加钢问世。另外，由于 W 只是限于亚洲生产的战略性物资，因此第一次世界大战以后，用 Mo 取而代之的 Mo 系高速工具钢得到了开发。直至 1945 年前后，美国钢铁学会标准 AISI M2（日本工业标准 JIS SKH51：0.85% C-4% Cr -5% Mo-6% W-2% V）钢种得到普及并延续至今。

2.2.3　近代工模具钢的发展过程

自迈克尔·法拉第于 1818 年开始研究合金钢起，到后来钨系工模具钢及至高速工具钢的诞生过程如前所述。那么，现在所用的工模具钢又是怎样诞生的呢？

1900 年初，含钨低合金钢曾被用于锯条和丝锥等。这主要是通过形成微细碳化物来增强耐磨性，以及利用晶粒细化效果而得以实现的。

成为现在冷作模具钢基础的高碳-高铬钢也起源于哈德菲德对钢中不同含铬量影响的研究。1900 年，英国谢菲尔德的库恩里奇（Kueh-

nrich）研制出了高铬切削工具钢。作为切削工具钢，它的高温强度虽然还未达到预期效果，但却作为模具钢得到了应用。该技术从英国传到了美国，在1920年前后，研究人员为提高这种钢的淬透性而添加了钼（Mo），由此逐渐形成了现在的美国通用空冷模具钢 AISI A2。

热作模具钢的发展经历了从 Cr-W 系到 Cr-W-V 系再到 Cr-Mo-V 的演变。最初人们添加钨（W）是为了提高钢的淬透性，但其实是同时添加的锰（Mn）起了作用。

1920年前后，将高钨系高速工具钢中钨（W）的质量分数减半的钢种 H21（0.3% C-3.4% Cr-9% W-0.5% V）成为了美国标准钢种[9]。不过，现在的 JIS 标准钢种中并没有将其纳入，最接近的钢种是 SKD4。

进入20世纪30年代，Cr-Mo-V 系的 H11（0.38% C-1% Si-5.2% Cr-1.4Mo-0.4% V）钢、H13（0.38% C-1% Si-5.2% Cr-1.4Mo-1% V）钢及 Cr-M-W 系的 H12（0.35% C-1% Si-5.2% Cr-1.5Mo-1.4% W）钢相继被列入 AISI 标准。这些钢种分别成为 JIS 的 SKD6 钢、SKD61 钢、SKD62 钢的基础。其中 H11 钢还作为具有强韧性平衡的超强钢，应用于飞机起落架等。

2.3 日本的钢铁发展史与特殊钢

2.3.1 日本的钢铁发展史

据说日本是在绳文时代后期，公元前300年前后开始使用铁器的。以前曾说日本铁器的使用始于弥生时代，但在福冈县二丈町深江曲田遗址发掘出了被认为是板斧头部的小铁片，说明在开始耕种水稻的时期就已将石器和铁器并用[10]。

日本的铁器文化被认为是经历了下列三个阶段：

① 铁器制品从其他地域传入。

② 利用旧制品翻造出新的铁制品。

③ 利用自有资源进行炼铁。

第三阶段似乎是发生在公元 6—8 世纪。

前文介绍了欧洲、中亚、印度的钢铁发展，日本也有在世界上可引以为豪的炼铁技术和钢铁。日本刀就是显示其技术水平之高的见证。日本刀用“玉钢”制成，而玉钢又来自踏鞴（Tatala）炼铁法。这种方法一直持续到西洋式炼铁法普及的大正年代[3,11,12]。

这是以优质砂铁资源丰富的日本和中国地区为中心兴起的炼铁方法，即是用耐火黏土制成尺寸为 1m×1m×3m 左右的炉体，将砂铁和木炭混合装入后，用鞴（风箱）送风的高温炼铁方法。其中又有制造“和钢（玉钢）”的押鉧法和制造生铁的押铣法。

到了明治时代，鉴于军事需要，陆海军的工厂转向使用坩埚炉、平炉、电炉的现代炼钢法。八幡制铁所于 1901 年建成投产。

2.3.2 特殊钢的制造与工模具钢

了解了铁在日本的发展过程后，再来了解一下特殊钢的发展历史。作为模具材料的工模具钢，涉及多种合金元素并经各种热处理后使用，可以说是最典型的特殊钢。

日本的工模具钢曾用坩埚炼钢法制造，后来使用电炉和废钢原料的电炉炼钢逐渐普及，到了 1920 年超过了坩埚炼钢。当时军用方面，工模具钢基本可自给自足，但民用方面则一度依靠进口。明治后期（1906 年），开始从英国的谢菲尔德（Sheffield）进口；到了昭和初期（1930 年前后），从欧洲和美国进口了大量的工模具钢。

在这里需要对“特殊钢”的由来加以说明。大正初期之前，普通钢之外的特殊用途钢曾叫做“特种钢”。渡边三郎于 1915 年创设“日本特殊钢”公司之时命名为“特殊钢”。据说当时德国的特殊钢厂家在公司名称前冠以 Edelstahl（高贵的钢），以区别于普通钢，借鉴于此译文将其称为“特殊钢”[13,14]。

用于模具材料的工模具钢是特殊钢当中的一种，很早就用来制作刀剑、农机具及各种工具，所以称为高贵、贵重的钢也是理所当然的。

到了 1930 年前后，特殊钢厂家相继建立，国产制品产量逐渐超过进口制品。现在的工模具钢中不但有 JIS 标准钢，也有各厂家独自

开发的企业品牌。所以，即使钢的成分相同，厂家也会通过对合金元素的调配及制造方法的调整等来达到更高的质量和性能，以此体现出自己的特色。

2.4　模具的历史

最后来回顾一下模具的历史。总体来讲，模具得到广泛使用的时期，是在汽车和家电产品等得到大量生产的近50年。

如果从广义上把模具视作金属制工具的话，那么代替石器的铁制刃具等也应归于这一范畴。不过按照第1章中“用金属制成的模子，通过冲压、锻造、铸造等方法反复生产同一种制品的工具”的模具定义来看，用于制造货币的工具应算是最早的模具之一。

据传，最初在吕底亚（Ludia）地区出现了带有压印的金属货币，之后于公元前7世纪发明了铸造货币。

至此为止，本节从“模具材料可追溯到何时”的单纯疑问，进而对工模具钢、特殊钢以及铁的历史作了一些介绍。现如今，日本的模具技术享有世界最高品质的声誉，而支撑其基础的模具材料的历史又可追溯到公元前5000年之久，正可谓是与人类同步发展至今。

参考文献

[1] バナール（鎮目恭夫訳）：歴史における科学 I，みすず書房（1967），p63.
[2] 同上，p.87
[3] 清永欣吾：工具鋼，日本鉄鋼協会（2000），p13
[4] 清水健次：ふぇらむ，vol.4（1999），No.12，p843
[5] 素形材技術解説書製作委員会：素形材技術，素形材センター（2005），p51
[6] G. A. Roberts，R. A. Cary：Tool Steels，4 th Edition，American Society for Metals（1992），p1
[7] 中沢護人：鉄のメルヘン，アグネ社（1975）

［8］）J. M. トーマス（千原秀昭，黒田令子訳）：マイケル・ファラデー，東京化学同人
［9］ P. Payson：The Metallurgy of Tool Steels，John Wiley & Sons，Inc.（1962），p226
［10］ 飯田賢一：ふぇらむ，vol. 1（1996），No. 1，p54
［11］ 高橋一郎：ふぇらむ，vol. 1（1996），No. 11，p855
［12］ 館 充：ふぇらむ，vol. 1，（1996），No. 12，938
［13］ 矢島忠正：ふぇらむ，vol. 9（2004），No. 5，306
［14］ 矢島忠正：特殊鋼の父，渡辺三郎，その生涯と日本特殊鋼，里文出版，（2005）

专栏 2

成为历史遗产的炼钢电炉

电炉炼钢法是利用电力的炼钢方法。从 19 世纪末到 20 世纪初期，各种电炉纷纷问世，其中赫鲁特（P. Heroult）式电炉成为现代特殊钢熔炼法的基础。

大同特殊钢（株）的创始人福泽桃介先生，曾经致力于发展电力事业，其后为对电力加以利用，开始了电力炼钢。图 2-4 所示照片为 1. 5t 赫鲁特式电炉。该电炉是大正 5 年（1916 年）大同特殊钢（株）前身的电力制钢所最初使用的电炉。

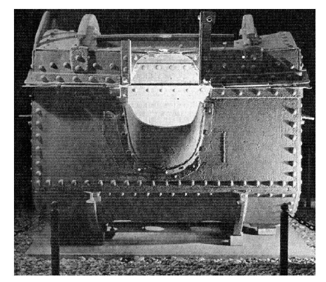
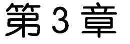


图 2-4 1. 5t 赫鲁特式电炉

该电炉于 1988 年被美国金属学会 ASM（American Society for Metals）指定为历史遗产（Historical Landmark），现在作为大同特殊钢（株）的传家宝展示于知多工厂，静静地守护着远远超出当时规模的大容量和高效率的现代化特殊钢熔炼工厂。



第3章 模具材料的性能要求

对模具材料有哪些性能要求呢？这要分别从各种模具在使用以及制作模具时的性能要求来考虑。

因为模具的成形方式及加工对象材料多种多样，所以对模具的性能要求较多，此外还有精度和可靠性要求。因此，模具的制作加工成本较高。鉴于此，模具材料是否易于制作加工模具的性能也显得十分重要。

3.1 模具材料的基本性能

根据模具加工对象材料的种类、成形方法和温度等的不同，对模具的性能要求也有所不同，应首先对其基本性能予以充分了解。一般来说，要想得到较长的使用寿命，需要通过硬化等来提高模具的强度及耐磨性。另一方面，提高强度又容易产生开裂和崩角，因此掌握好两者的平衡至关重要。在此，本文先就模具材料的基本性能加以阐述。

3.1.1 显微组织（Microstructure）

用作模具材料的工模具钢，其性能受其组成（化学成分）和显微组织的影响。用显微镜观察到的微观世界称为显微组织。这里以冷作模具钢为例进行介绍。图 3-1 所示为冷作模具钢 SKD11 在淬火和回火后的显微组织示意图。基体（Matrix）上分布着碳化物（Carbides），碳化物分为从熔融状态凝固时析出的粗大碳化物及球化退火时析出的微细碳化物两种。基体的化学成分约为 0.5% C-7.5% Cr-1% Mo-0.3% V，由硬度达 700～740HV 的硬质组织马氏体及软质组织残留奥氏体构成。

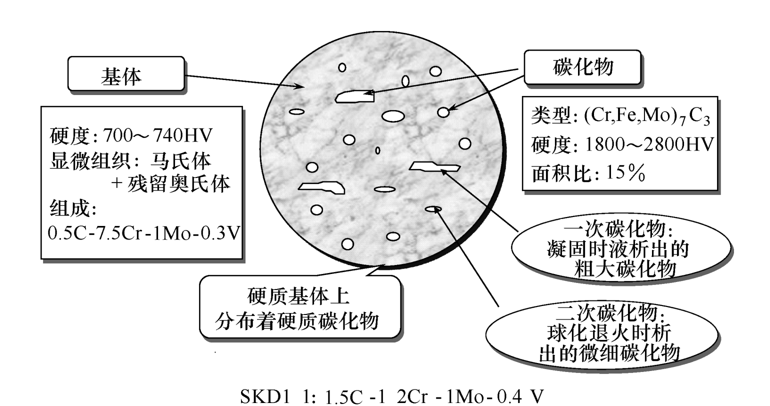


图 3-1　冷作模具钢 SKD11 在淬火回火后的显微组织示意图

与 SKD11 钢的组成相比，基体的各化学成分均有所减少，其余的合金元素则存在于碳化物之中。在此形成的碳化物形式为（Fe，Cr，Mo）$_7$C$_3$，以约 15% 的面积比分散于基体当中。该碳化物的硬度可达 2000 ~ 2800HV。总而言之，这是一种硬质基体中分布着坚硬碳化物颗粒的高耐磨组织。

工模具钢的化学成分决定着热处理后的基体组成，其基体组成又影响着强度和韧性等性能。表 3-1 为典型的碳素工具钢 SK105、冷作模具钢 SKD11 和高速工具钢 SKH51 的化学组成[1,2]。这是把碳化物经电解提取后进行分析，然后根据总成分计算的结果。另外，如今利用热力学数据和计算状态图也能算出。

表 3-1　碳素工具钢 SK105、冷作模具钢 SKD11 和高速工具钢 SKH51 的化学组成

钢种	分类	热处理	化学成分（质量分数，%）					淬火组织中的未溶碳化物
			C	Cr	Mo	W	V	
SK105	全体	—	1.05	—	—	—	—	Fe_3C
	基体	780℃淬火	0.8 ~ 0.9	—	—	—	—	
SKD11	全体	—	1.5	12.0	1.0	—	0.3	M_7C_3：19%
	基体	1030℃淬火	0.5	7.5	1.0	—	0.3	
SKH51	全体	—	0.85	4.2	5.0	6.1	1.9	M_6C：14%，MC：2%
	基体	1220℃淬火	0.5	4.6	3.0	2.0	1.0	

基体的组成决定着种种性能。例如，含碳量决定着硬度、淬透性、强韧性及耐热性等，其他性能又取决于 Mn、Ni、Cr、Mo、W 等合金元素含量。

碳化物是称作碳化物形成元素、即易与碳原子结合的合金元素与碳形成的化合物，分为很多种。Cr、Mo、W、V、Ti 等是具有代表性的碳化物形成元素。碳化物均为硬质，其种类、硬度[3]及特点见表 3-2。其中 Fe_3C（渗碳体）是最基本的碳化物，存在于碳素工具钢和低合金工具钢中。当含有合金元素时，它们与碳元素的结合方式则

有所不同，例如会变成（Fe，Cr)$_7C_3$或 Fe_4Mo_2C 等形式，常以 M_7C_3 及 M_6C 等来表示。

表 3-2　碳化物的种类、硬度和特点

碳化物类型	硬度　HV	碳化物种类	特　　点
M_3C	**1200～1800**	Fe_3C	存在于碳素工具钢和低合金工具钢中。Fe 还可由 Cr 和 Mn 置换
$M_{23}C_6$	**1000～1800**	(Fe，Cr)$_{23}C_6$	存在于高 Cr 模具钢之中
M_7C_3	**1800～2800**	(Fe，Cr)$_7C_3$	主要存在于高 C-高 Cr 模具钢（例如 SKD11）之中，是增强耐磨性的碳化物
M_2C	**1800～3000**	Mo_2C，W_2C	高速工具钢等 Mo 和 W 含量较高的钢种，在回火时析出，有二次硬化效果
M_6C	**1600～2300**	Fe_4MO_2C	存在于像高速工具钢等 Mo 和 W 含量较高的钢种之中
MC	**2250～3200**	WC，VC，TiC	硬质碳化物有助于提高耐磨性。VC 和 WC 有助于二次硬化

由表 3-2 可见，与硬度不超过 1000HV 的工模具钢基体相比，碳化物的硬度更高，像 W_2C 及 TiC 等可高达 3000HV。

工模具钢的硬度取决于基体硬度、碳化物的硬度和数量。形成碳化物元素的质量分数越高，其碳化物的硬度就越大，比如与 3% 含量的碳素工具钢相比，5% 含量的高速工具钢的硬化效果更明显。另外，其对耐磨性的贡献要大于硬化效果。

3.1.2　硬度（Hardness）

为了便于切削加工，工模具钢通常是以软质的退火状态供应市场，经粗加工后，再通过热处理得到高硬度来提高其耐磨性。那么，工模具钢的热处理可使硬度达到何种程度呢?

首先，淬火时可达到的最高硬度与钢种无关，只取决于含碳量。淬火硬度与碳的质量分数的关系如图 3-2[4] 所示。碳素钢与合金钢之间没有差异，淬火硬度均随碳的质量分数的增加而上升，并于 0.5%

时达到饱和，其硬度为 65HRC。在碳的质量分数达到 0.5% 之前，碳会溶入基体中，并在淬火时有助于形成坚硬的马氏体，超过这个含量之后，则会形成碳化物。在实际生产中，淬火后要进行回火，对强度和韧性进行适度调整后才开始使用，所以最终的使用硬度会低于淬火硬度。

另外，如前所述，高合金钢和高速工具钢的硬度有时会超过 65HRC。其原因是微细碳化物的析出硬化及高硬度碳化物面积比的增加。

3.1.3 淬透性（Hardeneability）

图 3-2 所示为钢经过理想淬火，所有组织均转变成马氏体时的硬度。不过，在实际应用当中，也有像压铸模那样超过 1t 的大型模具，其内部冷却速度会慢于表面。因此，当模具淬火时，根据模具大小和形状来考虑模具材料的淬透性就显得十分重要。

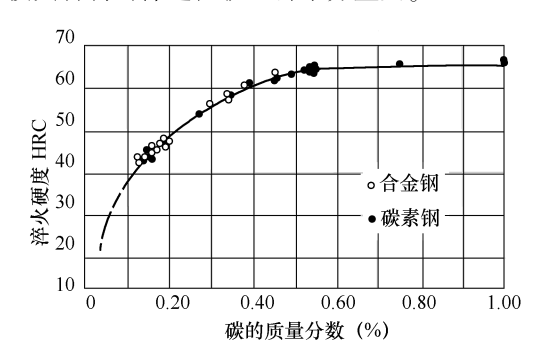


图 3-2　淬火硬度与碳的质量分数的关系

所谓淬透性，是指钢在淬火时可获得马氏体层深度的能力 。换言之，淬透性也指一定尺寸的材料中心部可得到马氏体含量的能力。淬火时，若出现马氏体以外的软质组织（不完全淬火组织），则会降低淬火硬度，以至产生回火后韧性降低等问题。下面讨论淬透性的表示方法。

1. 临界直径

理想临界直径（D_I）是淬透性的表示方法之一。在理想的冷却淬

火条件下，材料中心区域可完全得到马氏体组织的直径，用下式表示。

$$D_I = D_0 \cdot f_{Si} \cdot f_{Mn} \cdot f_{Cr} \cdot f_{Mo} \cdots$$

式中 D_0——取决于含碳量和奥氏体晶粒度的理想临界直径；

f_{Si}，f_{Mn}，f_{Cr}，f_{Mo}——各合金元素的淬透性系数（Multiplying Factor）。

图3-3所示为各种合金元素的淬透性系数[5]。Mn、Cr、Mo是提高钢的淬透性的元素，还有Si和Ni也有同样功效。因此，通过添加这些元素，即使是大型模具也可淬硬至心部。

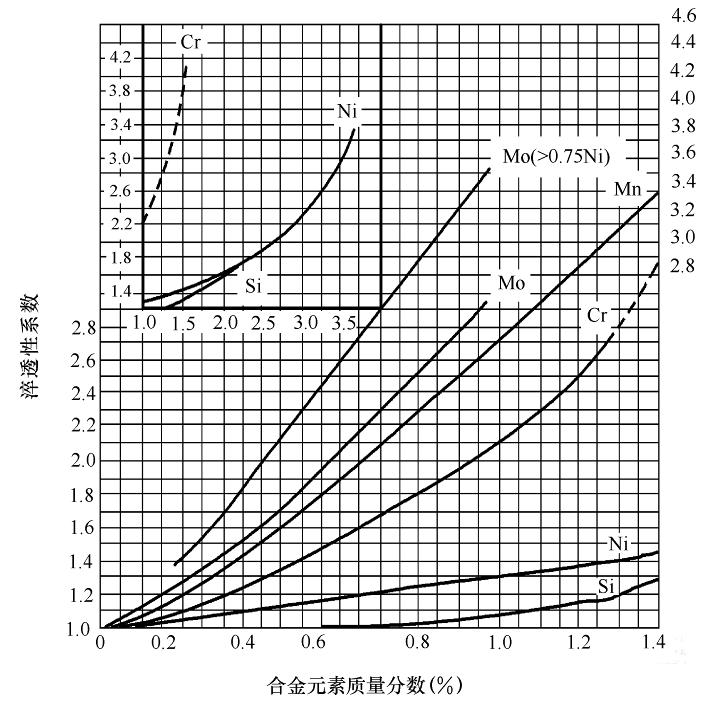


图3-3 各种合金元素的淬透性系数

在实际应用当中，可利用取决于含碳量和晶粒度的常数以及由各合金元素含量算出的淬透性系数来计算 D_I。受含碳量影响的还有碳化物形成元素，这些元素变为碳化物后，其影响会相应减少。晶粒度越小，淬透性越差。

2. 淬透性曲线：乔米尼端淬试验

乔米尼端淬试验是 JIS G0561 标准所规定的方法[6]，即将直径为 ϕ25mm、长为 100mm 的圆棒试样在淬火温度加热后垂直固定，从下方喷水来冷却淬火。淬火后，在试样的两侧磨出相互平行的平面用于测试硬度，磨削深度为 0.4mm；按测量点距淬火端的距离绘制曲线图，即为淬透性曲线（乔米尼端淬曲线）。钢的淬透性越好，曲线就越平坦，至距端部较远处也可得到较高的硬度。碳素工具钢 SK105 及低合金工具钢 SKS93 的淬透性曲线如图 3-4 所示。不过，对淬透性好的工模具钢来说，它们的淬透性曲线均较平坦，反倒不易区分淬透性的差异。

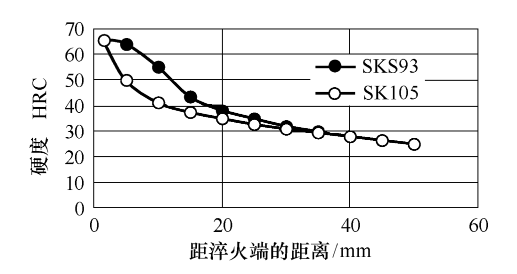


图 3-4　碳素工具钢 SK105 和低合金工具钢 SKS93 的淬透性曲线

3. 连续冷却转变图和等温转变图

表示工模具钢的淬透性可用连续冷却转变图（CCT 曲线，Continuous Cooling Transformation Curves）。它表示加热到淬火温度后，在不同冷却速度的连续冷却条件下，冷却速度、冷却时间与转变产物的关系。以共析钢［w（C）=0.8%］为例来说明，如图 3-5 所示。当冷却速度较高时，转变为只有马氏体的完全淬火组织。反之，当冷却速度较低时，较变为包括贝氏体和珠光体的不完全淬火组织。将不产生不完全淬火组织的极限冷却速度称为临界冷却速度。钢的临界冷却速度越小，即使在较缓慢的冷却速度下也越容易淬上火。

用等温转变图（TTT 曲线，Time Temperature Transformation Curves）也可表示钢的淬透性。它表示从淬火温度快速冷却至某一预定温度等温保持时，该温度下转变产物与转变时间的关系。以亚共析

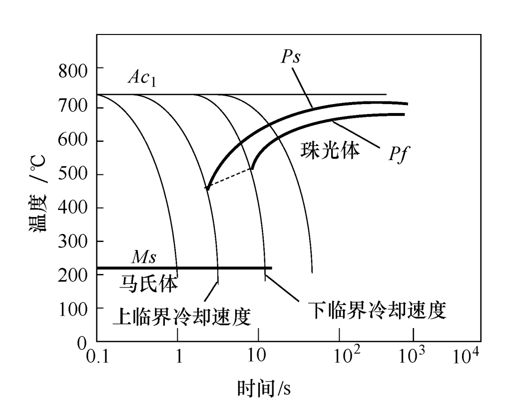


图 3-5　连续冷却转变图示例

钢为例来说明，如图 3-6 所示。在约 550℃处有两条“*C*”字形曲线，其中左侧的为转变开始线，右侧的为转变终了线。另外，在低于 230℃的低温区域有两条水平线，高温的为马氏体转变开始温度线（*Ms*），低温的为马氏体转变终止温度线（*Mf*）。观察所得到的显微组织，从高温区起分别为珠光体、上贝氏体、下贝氏体及马氏体。

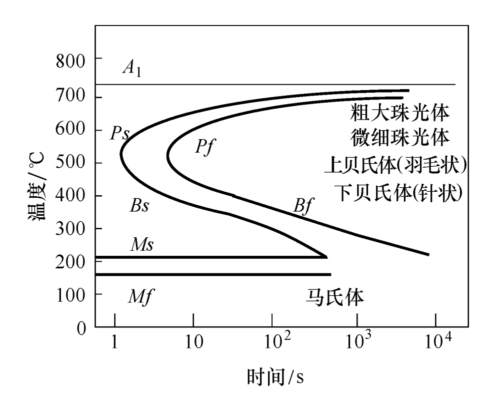


图 3-6　等温转变图示例

与等温转变图相比，实际热处理较接近于连续冷却转变图，所以连续冷却转变图可用来评价钢的淬透性。

3.1.4 耐磨性（Wear Resistance）

磨损现象大致分为粘着磨损（Adhesive Wear）和磨粒磨损（Abrasive Wear）。粘着磨损是指两个滑动面上的微小凸起部分因摩擦产生金属黏着，又因相对运动被拉开时附着于某一方，导致在另一方强度较弱的部位发生微小破损的现象。因此，相互接触金属间的合金化及固溶化的容易程度会对此有影响。磨粒磨损是指因硬质颗粒及表面凹凸而引起的刻划或切削现象的磨损。

一般来说，负荷越大，磨损量也就越大，硬度越高，磨损量越小。通过将各种金属和合金用研磨纸研磨来观察硬度对耐磨性的影响，可以发现：不同金属之间的硬度和耐磨性有着明显的相关性[7]。另外，当对某一材料进行热处理改变其硬度时，其硬度对耐磨性的影响则较小。

模具材料的耐磨性取决于基体和碳化物各自所占的面积比及硬度，即使基体硬度相同，随着硬质碳化物的增多，耐磨性也会相应增加。因此，要提高模具材料的耐磨性，关键在于选用硬度高且碳化物面积比高的钢种，并施加可靠的热处理来避免产生软质的不完全淬火组织。

一般用磨损量来表示钢的耐磨性，操作方法是：用大越式磨损试验机对经过平面加工的试样连续施以一定的接触压力，并使之转动一定的距离，将在单位接触面积及单位摩擦距离下的试样磨损体积用比磨损量来表示。

3.1.5 强度（Stength）——抗拉强度、抗压强度、抗弯强度、抗扭强度

模具在使用中承受着各种负荷。从应力形态上可分为拉伸、压缩、弯曲、扭转应力，从负荷状况上又有静态、冲击及反复之分。通常情况下，模具不会因一次负荷而损坏，多因反复多次负荷导致疲劳现象而造成损坏。当然，在超负荷的情况下有时也会在极短的时间内出现破损。

抗拉强度（Tensile Strength）是材料最基本的性能。但是，经淬火和回火后的高硬度冷作模具钢和高速工具钢由于韧性不足，在连接

等处会出现破断而难以发挥出自身的抗拉强度。因此在测试时，不宜用 JIS 规定的试样，而应用不带螺纹的、应力集中较小的试样。为了测得准确的屈服强度，应将应变仪贴在试样上以便求出准确的应力-应变曲线等。另外，在测量方法上也要下一番工夫。冷作模具钢的抗拉强度与硬度的关系如图 3-7[8] 所示。

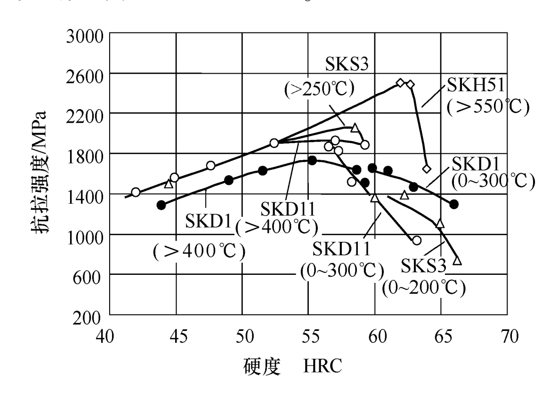


图 3-7 冷作模具钢的抗拉强度与硬度的关系

与抗拉强度不同，抗压强度随着硬度的上升几乎一直成正比例增大[9]。图 3-8 所示为抗压强度与硬度的关系[10]。不同钢之间的抗压强度不同是因为其显微组织不同，当回火温度不同导致存在软质的残留奥氏体时，会降低抗压强度。

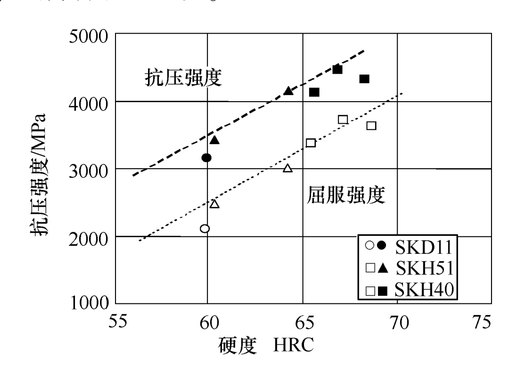


图 3-8 抗压强度与硬度的关系

另外，测量工模具钢强度的试验方法还有弯曲试验和扭转试验，目前已有许多数据。弯曲试验是指对试样施加弯曲载荷，使受到拉伸应力的一侧产生破裂，并验证此时如对局部变形进行补正的话，该弯曲断裂应力与抗拉强度几乎相等。拉伸试验不易得到准确的强度值，相比之下，弯曲试验则简便易行，求出的屈服应力和断裂应力可以作为抗弯强度。

另外在扭转试验中，以扭转屈服应力和扭转断裂应力作为抗扭强度。这对于测量承受扭转应力的轴状工具，如丝锥及钻头等转动工具的强度来说十分重要。

3.1.6 疲劳性能（Fatigue Property）

模具的破损大多不是受单一静态负荷，而是受到交变负荷的影响。一般情况下，在未达到由单一负荷测定的抗拉强度及抗压强度时模具就出现了破损，将之称为疲劳现象，这在实际设计模具中要特别留意。

实用模具的疲劳过程难以准确再现，通常利用 JIS 中规定的小野式回转弯曲疲劳试验来进行评价[11]。该方法是将圆筒形试样连续回转，在附加弯曲力矩并予以一定交变应力的条件下，测定试样直至断裂的应力次数。以应力值为纵坐标，达到断裂前的交变应力次数为横坐标，所得数据绘成的图称为 S—N 曲线图（Stress-Number of Cycles），用于评价疲劳性能。将发生断裂之前的应力称为疲劳极限。一般来说，交变应力次数达 10^6 次或 10^7 次不发生断裂的应力称之为疲劳强度。

S—N 曲线如图 3-9 所示。不同工模具钢疲劳强度与硬度的关系如图 3-10[12] 所示。通常疲劳强度随着硬度及强度的增高而增高，但达到某一强度后，疲劳强度会出现饱和或下降。

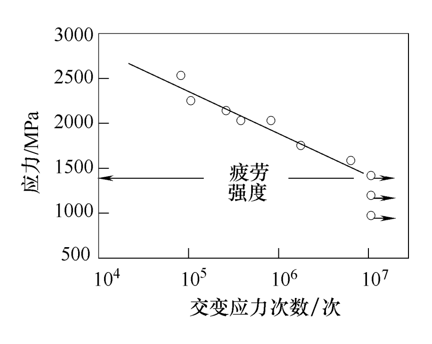


图 3-9 S—N 曲线

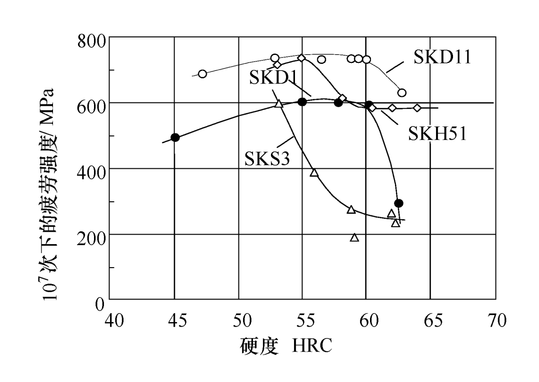


图 3-10　不同工模具钢疲劳强度与硬度的关系

需要说明的是，模具破损通常发生在 10^4 次或 10^5 次左右，高应力—低周疲劳强度尤为明显。冲头类工件的表面如有弯曲负荷则会产生拉应力，在凹模内部的圆周方向上也会有拉应力出现。由于此类拉应力的反复作用造成疲劳损坏的情况较多，所以在设计时需要将该因素考虑进去。

疲劳强度的大小与抗拉强度和钢种有关。特别是组织中有粗大碳化物的冷作模具钢，会以此为起点发生疲劳破损现象，所以具有微细碳化物的高速工具钢具有较高的疲劳强度。一般来说，粗大碳化物的尺寸较长、较宽，且所占比例越大，碳化物自身开裂的概率也就越高，其疲劳强度也会随之降低[13-16]。

此外，表面质量对疲劳强度的影响也较大。高硬度材料的表面粗糙度值越高，越容易造成缺口效应而成为开裂起点，降低疲劳强度。

表面脱碳引起硬度下降，以及因组织转变时间点的不同而形成拉应力时，会降低疲劳强度。另外，电火花加工的加工变质层，尤其残留的熔融凝固的白层，其中存在的裂纹会成为疲劳破损起点。因此，电火花加工后通过研磨等去除加工变质层是十分重要的。

另外，为提高耐磨性而对模具进行渗氮处理后，会在表面形成压应力，可抵消模具上的拉应力，从而提高疲劳强度。

3.1.7 韧性（Toughness）

韧性是与硬度和强度相对的性能。例如，玻璃及陶瓷的硬度可达 3000HV 以上，虽然是极硬材料，但摔落后却极易破裂。模具不仅需要具有强硬性，还要具备抗开裂、抗崩角的韧性。作为模具材料，也要同时具备强硬性和韧性。

那么，什么是韧性呢？韧性可以说是应变能和强度（弹性强度）的组合。其中，应变能是指材料断裂之前可变形的能力，分为弹性应变能和塑性应变能[17]。弹性强度是可抵抗永久变形的强度。对模具来说，如果只考察其达到破坏前的塑性应变能，那么当弹性强度较低时，即使有一定的应变能，模具也会出现软化塌陷，不耐用。

因此，弹性强度较高，不易软化塌陷，且断裂前变形量较大的材料可称为富有韧性。仅对塑性变形范围的应变能进行评价时称为延展性，相当于拉伸试验中的伸长率和断面收缩率等。

典型的测量韧性的方法是夏比冲击试验，即求出冲击载荷时的冲击吸收能量的方法。该试验方法的详细内容将在本书第 6 章进行介绍。简而言之，它是将带 U 型或 V 型缺口的试样，利用落下的摆锤冲击来求得试样断裂前吸收能量的方法。对经过淬火和回火的高硬度状态的工模具钢来说，U 型及 V 型缺口的冲击韧度较低，难以进行比较，所以一般多用带有 10mm 圆角的 C 型缓和缺口试样进行试验。将冲击吸收能量除以断面横截面积得到的数值用 J/cm^2 单位来表示，即为冲击韧度。

冲击韧度是试样断裂前所吸收的累积能量。如果把应变仪贴到摆锤上测量试样受打击时的应力—应变曲线，还可将缺口出现裂纹之前的吸收能量与裂纹扩展时的吸收能量分别进行考察。这种方法被称为计测式夏比冲击试验。对模具来说，测得裂纹发生前的吸收能量十分重要。对于高硬度的模具材料，在裂纹发生前的吸收能量所占比例较大，并与总的吸收能量成正比，所以可用通用试验得到的冲击韧度进行定性比较。高强度钢和低强度钢的夏比冲击试验的冲击吸收能量曲线如图 3-11 所示。高强度冷作模具钢的冲击吸收能量曲线如图 3-11a

所示，几乎都是裂纹发生之前所消耗的能量。而低强度热作模具钢的冲击吸收能量曲线则接近于图 3-11b，扩展能量也增大。

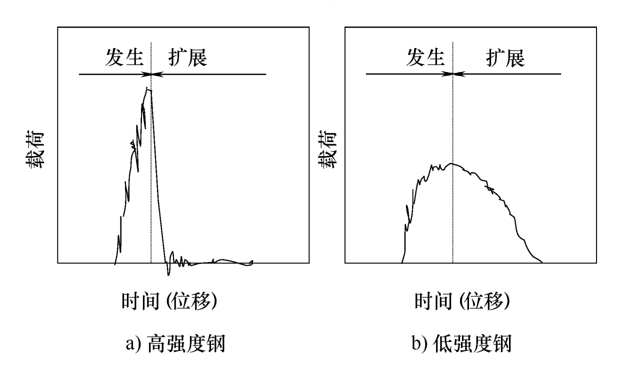


图 3-11　高强度钢和低强度钢的夏比冲击试验的冲击吸收能量曲线

高硬度高强度材料的断裂多为不产生塑性变形的脆性断裂。表示此脆性断裂的特性是断裂韧性（Fracture Toughness）[18]。其试验方法如图 3-12 所示。

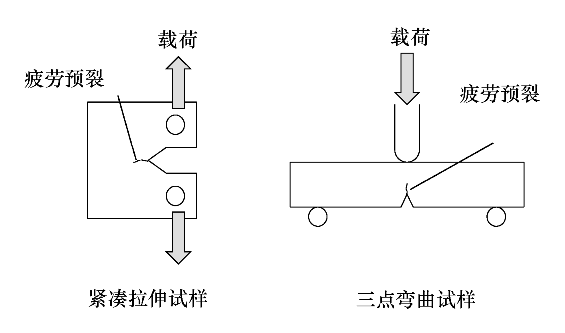


图 3-12　断裂韧性试验方法

先在紧凑拉伸（Compact Tension，CT）试样或三点弯曲试样上用交变载荷开出极为尖锐的预裂纹，然后用加载断裂时的载荷和裂纹长度求出应力扩大系数 K 来表示断裂韧度。K 值可表示为

$$K = F\sigma\sqrt{\pi a}$$

式中　σ——应力；

a——裂纹长度；

F——与形状和裂纹长度相关的形状修正系数。

断裂韧度与冲击韧度不同，其特点是能计算出引起脆性断裂的允许缺陷尺寸，可反映到实际的模具设计当中。尤其是存在缺口和裂纹时，可用来判断裂纹扩展的可能性。但该试验花费时间较长，而且冲击韧度与断裂韧度有着较好的对应性，所以可用冲击韧度来对韧性做定性评价。

压缩试验是通过测量破裂前的压缩量来得出应变能的。静态弯曲试验可代替拉伸试验，广泛用于硬质工具钢的性能测试。此外，静态扭转试验是适用于测量韧性的方法。这些方法均可通过在试验时得到应力—应变曲线来求出屈服强度、弹性变形量、弹性应变能、塑性变形量和塑性应变能。弯曲试验和扭转试验也可用于考察工模具钢的强度和韧性[19]。

3.1.8　高温强度（High Temperature Strength）

模具在高温下使用时，需要一定的耐热性即高温强度。热锻模、压铸模、热挤压模等模具在高温下与加工对象接触，特别是热锻模还有加工对象的变形热，使模具表面温度上升，有时会超过相变点。此时如果所受应力超过高温屈服强度则会产生塑性变形。再有，锻模等的加工对象发生变形滑动，还会使模具表面发生塑性流动。

高温强度主要取决于合金的化学成分，Mo、W 及 Co 等是提高高温强度的元素。高温强度可通过高温拉伸试验来测定，其测定方法与常温拉伸试验相同。另外，简易测量高温强度的试验法还有高温硬度试验，一般是将试样加热后测定其维氏硬度。

3.1.9　合金元素对工模具钢的影响[20]

特殊钢的定义之一是其中含有各种合金元素。在此，将典型合金元素对工模具钢的作用加以整理。合金元素排列于化学元素周期表中，化学元素周期表由俄罗斯科学家门捷列夫于 19 世纪发明，合金元素按原子序数递增的顺序排列，属于同一族的元素具有相同的特

性。典型合金元素的物理常数见表3-3。

表3-3　典型合金元素的物理常数

物理性质 \ 元素符号		C	Si	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Mo	W
原子序数		6	14	23	24	25	26	27	28	42	74
相对原子质量		12.01	28.09	50.95	52	54.94	55.85	58.93	58.71	95.95	183.8
密度/(g/cm^3)		2.2	2.3	6	7.2	7.4	7.9	8.9	8.9	10.2	19.3
熔点/℃		3727	1430	1900	1875	1245	1536	1495	1493	2610	3653
热膨胀系数 $\times 10^{-6}$/K		0.6～4.3	2.8～7.3	8.3	6.2	22	11.8	13.8	13.3	4.9	4.6
热导率/[W/(m·K)]		23	80	29	64	152	72	69	88	136	167
比热容/[J/(kg·K)]		690	677	498	444	481	444	427	435	247	134
周期表	族	ⅣB	ⅣB	ⅤA	ⅥA	ⅦA	ⅧA	ⅧA	ⅧA	ⅥA	ⅥA
	周期	2	3	4	4	4	4	4	4	5	6

各种合金元素的特点以及对工模具钢的影响简要归纳如下：

1. 碳（C） Carbon

与Cr、Mo、V元素结合形成碳化物。固溶于基体中的碳在淬火时有硬化马氏体的作用。

2. 硅（Si） Silicon

硅是地球上存在量最多的元素，炼钢时用于对钢液脱氧，与镍及铬共存可改善淬透性。硅不形成碳化物而是固溶于基体中，是提高基体强度和耐热性的元素。

3. 锰（Mn） Manganese

锰在钢液精炼时用于脱氧和脱硫。其中一部分锰与硫（S）结合形成非金属夹杂物硫化锰（MnS），残留于基体当中。此夹杂物会降低模具材料的韧性。有时为了改善切削性也会特意添加硫元素。

固溶于基体中的锰元素会大幅度提高钢的淬透性，是对淬透性影响最大的元素。另外，锰与镍（Ni）同样具有稳定奥氏体的作用，如锰的质量分数为 13% 的奥氏体钢就是著名的哈德菲尔德高锰钢。

4. 镍（Ni）Nickel

镍固溶于基体中，既可提高钢的强度，也可改善其韧性。镍也可提高钢的淬透性，但效果不如锰和铬。

添加镍的工模具钢较少，锻模用钢（JIS SKT4）添加镍是为了提高其韧性。

5. 铬（Cr）Chromium

铬是工模具钢当中应用最多的元素，起到多种作用。在日本国内，铬的价格较为廉价，便于使用。

铬固溶于基体中，在改善钢的淬透性方面，其作用仅次于锰，且还可抑制回火软化。添加了铬，还可提高钢的韧性及高温强度，耐蚀性也会得到显著改善。虽然耐蚀性受含碳量的影响，但铬的质量分数达 13% 以上时，在空气和水等的一般腐蚀环境下，其腐蚀量会明显减少。

与钼和钒一样，铬元素易与碳元素结合，可形成各种硬质碳化物。这些碳化物分布于从低合金钢到高速工具钢的基体之中，对提高模具的耐磨性发挥着作用。

6. 钼（Mo）Molybdenum

与铬元素类似，钼元素固溶于基体中，可提高钢的淬透性，有助于改善其耐热性和耐蚀性，常作为冷作模具钢、热作模具钢和高速工具钢的添加元素。但含有钼的矿山资源有限，其价格较高。

钼最大的特点是，固溶于基体中的钼在 500℃左右回火时会析出微细的 Mo_2C 碳化物，显示出了较显著的析出硬化效果，如图 3-13[21] 所示。该析出硬化现象称为二次硬化。与钒、钨和铬等其他元素相比，钼的二次硬化效果最好。高速工具钢中添加质量分数为 4% 左右的钼，有助于实现高温回火时的高硬度。

7. 钨（W）Tungsten

钨的特性几乎与钼相同，可形成硬质碳化物，有助于提高二次硬

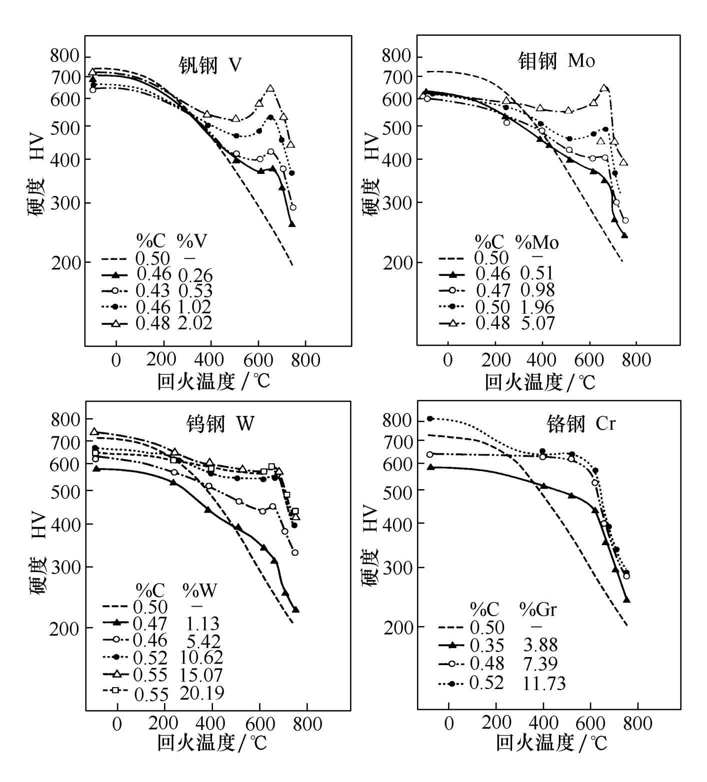


图 3-13 合金元素对二次硬化的影响

化效果。钨元素原来用于钨系高速工具钢（SKH2）中，但其产地限于中国，属于战略物资，添加一半含量即可达到同等效果的钼逐渐取而代之。目前添加钨的工具钢只限于高速工具钢等。

8. 钒（V）Vanadium

钒元素较易形成碳化物，与钼和钨类似，高温回火时可析出微细碳化物 V_4C_3，有二次硬化效果。通常在高速工具钢和粉末高速工具钢中大量添加钒元素，成为硬质颗粒分散其中，有增强耐磨性的作用。

9. 钴（Co）Cobalt

钴无法形成碳化物，而是固溶于基体中，有助于提高钢的耐热性

及耐高温蠕变性。在工模具钢当中，主要在承受高负荷的高合金高速工具钢中添加钴。

10. 铜（Cu）Copper

铜是具有赤色光泽的金属，其本身具有很好的延展性及切削加工性，但几乎没有作为工模具钢的合金元素使用。铜在部分钢种中会形成金属间化合物 Ni_3Cu，有析出硬化的作用。

3.2 模具制作的性能要求

接下来对模具制作时所要求的性能加以考量。如前所述，模具制作成本的 80% ~90% 是机械加工费用。因此，从保证质量、缩短交货期、降低成本方面考虑，也需要易于提高精度且便于制作模具的材料。

3.2.1 切削性（Machinability）

对模具的加工基本上是切削加工，并分为退火状态的粗加工和热处理后的精加工。无论是哪种加工方式，重点是确保切削刀具费用低、切屑容易处理、加工表面光滑，通常将这些特点统称为切削性。在实验室中对切削性进行考察时，可用工具磨损、切削抗力、切削温度、切屑形状及积屑瘤等项目来予以评价。

图 3-14 所示为切削速度与刀具寿命的关系，通常称为 VT 图（Velocity vs. Time to tool life），是通过改变刀具切削速度来测定刀具寿命的方法。横坐标表示切削速度一定时，刀具寿命可延长的时间，纵坐标表示刀具寿命一定时可达到的切削速度。对不同的模具材料，通过 VT 曲线可比较其切削性。近年来，为缩短工期，企业都希望

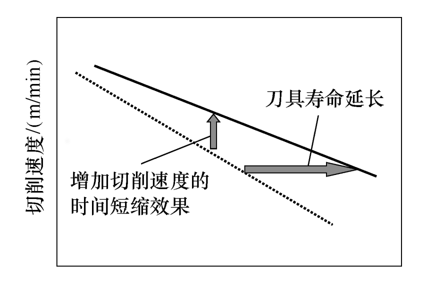


图 3-14　切削速度与刀具寿命的关系

尽可能地提升切削速度以加大单位时间切削量。测试切削刀具寿命时，多将前刀面及后刀面的磨损量设为定值。

切削刀具的磨损机理如图 3-15 所示。当切削温度较低时，磨粒磨损及粘着磨损等机械性磨损先发生，随着切削抗力的增大切削温度增高，此时扩散磨损及氧化磨损等化学性磨损则会优先发生。

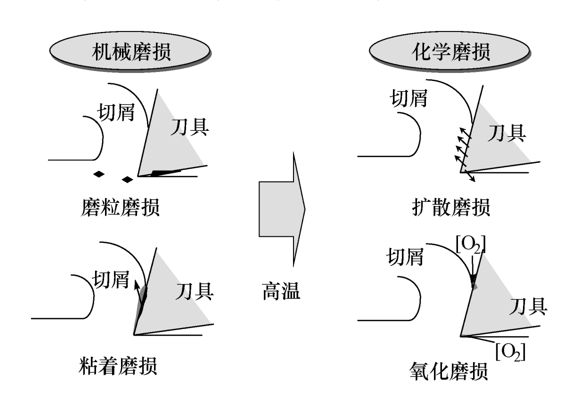


图 3-15　切削刀具的磨损机理

影响切削性的材料因素如图 3-16[22] 所示。模具材料的化学成分、热处理和加工过程决定着其强度及切削时的变形特性。钢中的非金属夹杂物也会影响变形特性和润滑性，从而最终决定着切削抗力和切削

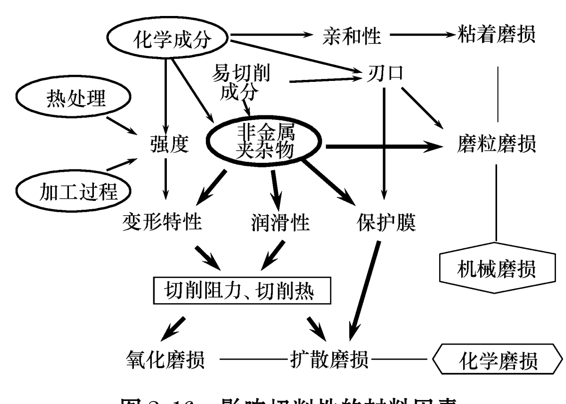


图 3-16　影响切削性的材料因素

热。这些因素影响着氧化磨损和扩散磨损。另一方面，模具材料的化学成分及其与切削刀具的亲和性、积屑瘤、非金属夹杂物的分布，则决定着粘着磨损和磨粒磨损的程度。

切屑处理性主要取决于断屑类型。如果切屑为连续卷曲状，特别是用钻头进行钻孔加工时，切屑不易排出会导致加工效率下降。理想的切屑是间断的短屑。

切削后的表面应平滑细致。一般来说，材料的硬度越高，切削性越差。但如果材料硬度太软（太粘），切屑会变得连续不断，表面也会粗糙，因此硬度要恰当。

从目前模具材料的使用来看，企业倾向于为延长模具寿命而采用高合金化的材料并极力降低杂质追求纯净化，结果造成切削抗力增加、延展性上升，以致切屑不够理想，同时导热性的下降导致切削温度上升、切削性下降。为此，人们纷纷转而对切削刀具表面作涂镀处理，或引进高刚性切削加工设备，采用高速切削并选定恰当的切削速度和切削深度等。

另外，切削性优良的模具钢称为易切削钢。其改善方法有三种：使非金属夹杂物和易切削元素铅（Pb）等颗粒呈弥散分布，使应力集中于此，以降低变形抗力；利用夹杂物的润滑减少摩擦；含钙（Ca）的复合夹杂物在切削过程中附着到刀具上起到保护膜的作用。易切削钢主要以结构钢为主体得到开发。对于强度及其他性能要求高的钢种，如工模具钢，其易切削元素的添加量有限。虽然如此，为了降低机械加工周期及成本，也会添加适量的硫元素，并通过对形成的硫化锰（MnS）形态进行控制，来改善材料的切削性。再有，使硬质碳化物微细化、均匀化等，也可改善模具材料的切削性。

3.2.2 尺寸稳定性（Dimension Stability）

模具必须经过粗加工、热处理、精加工后才能付诸使用，所以热处理后尺寸的变化量以及稳定性显得非常重要。如尺寸变化较大，不得不多留出精加工余量，致使加工周期增加。另外，根据模具形状的不同，在淬火冷却时有时会因内外温差造成热处理变形。

模具经热处理及精加工后使用时，随着时间的推移，会出现微米级尺寸变化。这种尺寸的时效变化对于精密模具来说是需要重视的。随着模具向精密化发展，有效控制热处理后尺寸的变化、形状变形以及时效变化，越发显得重要。

SKD11 钢的回火温度与尺寸变化如图 3-17 所示。这是以退火状态为基准，对淬火和回火后的尺寸变化进行测定所得的结果。在淬火状态，虽然马氏体转变后体积会发生膨胀，但从工件的长度和直径的比来看，直径稍有减小。随着回火温度的增加，其长度和直径又会收缩回原态。当温度达到 500℃时，因奥氏体分解转变为马氏体，可观察到体积有较大膨胀，回火温度继续上升后，体积又再次开始收缩。

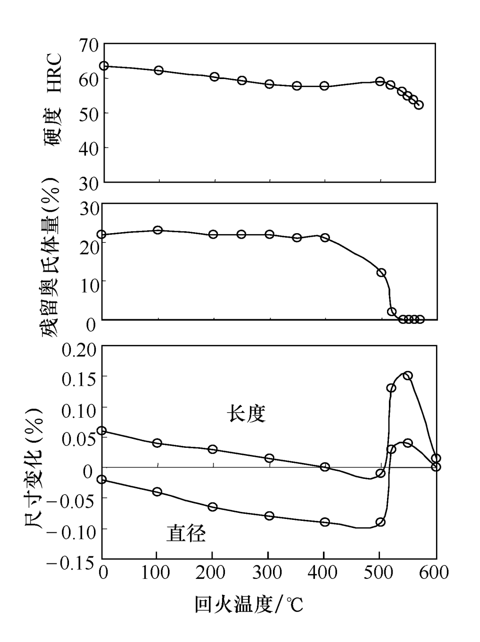


图 3-17　SKD11 钢的回火温度与尺寸变化

淬火温度不同，残留奥氏体的量也不同。即使它与回火温度造成的尺寸变化趋势相同，但其尺寸变化的绝对量也会出现差异，所以在使用模具时要加以注意。另外，虽然低温回火时模具的尺寸变化较

小，如需高温回火，则应在粗加工阶段预先考虑尺寸变化量。

对于变形，模具的形状和大小、模具材料的淬透性和淬火冷却方法等都会造成不同部位的淬火冷却速度有异，造成相变点不一致而引起热处理应力和相变应力的平衡变化，以致出现不同形式和程度的变形。所以应设法实现均匀冷却。

模具产生时效变化与其中残留奥氏体的稳定性有关，特别是对有精度要求，尺寸又较长的级进模等模具来说，更需要特别注意。其原因在于残留奥氏体随时间的推移发生马氏体转变而引起膨胀。不过，当对冷作模具钢进行低温回火时，尽管存在 15% ~20% 左右的残留奥氏体，因为其处于稳定状态，所以不会发生时效变化。但是，当进行高温回火时，即使有少量的未完全分解的残留奥氏体，也会因状态不稳定而在常温下逐渐发生相变，造成几十微米的膨胀。时效变化的问题及解决措施将在第 4 章中介绍。

3.2.3　镜面性

主要是塑料模具对镜面性有所要求。镜面性是指工件表面不出现针孔等微小缺陷、表面粗糙度值所能达到的微细程度，根据成形件和塑料种类的不同会有所差异。影响模具材料镜面性的因素见表 3-4。

表 3-4　影响模具材料镜面性的因素

分　类	因　素	对镜面加工性的影响
显微组织	微观偏析	微观偏析部分的微小硬度差造成表面质量不均匀
	碳化物	粗大碳化物脱落形成针孔，或残留后形成凸起
非金属夹杂物	氧化铝系（Al_2O_3）	脱落形成针孔
	硫化物（MnS）	形成不均匀的条纹或波浪纹
耐蚀性	抛光时的表面氧化	#8000 以上的超镜面，会因表面氧化产生桔皮或雾化现象

一般来说，材料的硬度越高越容易得到较高等级的镜面。通常要求使用显微组织微小、均匀无偏析、无非金属夹杂物的纯净钢。就显微组织而言，主要是碳化物颗粒要微小。显微偏析部位有碳化物的带状偏析、基体成分分布不均匀会导致硬度不同，从而研磨时使表面出现凹凸不平。非金属夹杂物在研磨过程中脱落，残留的凹坑随着研磨扩展，成为形成针孔的原因，所以该夹杂物越少越好。

此外，耐蚀性对镜面性也有影响。耐蚀性较差时，表面易氧化起雾，难以达到镜面要求。对模具材料进行精炼得到高纯度、无偏析的微细组织，也可提高镜面性。还有，在材料的任何部位均能得到同样稳定的品质也是重熔精炼的特点。

3.2.4 焊接修复性（Repair Weldability）

模具在制作时改变设计方案，或者加工过程中出现失误，需要用到焊接修复。再有，若模具在使用时出现裂纹及损伤，一般也会通过焊接修复再继续使用。例如压铸模等一般需定期去除其表面热龟裂，再通过焊接修复后反复继续使用。

另外，对于塑料模具，有时也会在焊接后的表面上进行蚀纹加工及研磨。因此，要求材料的焊接性良好，即不易出现焊接开裂、热影响要小。目前，各种改善焊接敏感性的材料纷纷得到了开发。

参考文献

[1] 佐藤智雄，西沢泰二，村井弘佑：鉄と鋼，Vol. 44（1958），p565
[2] F. Kaysen，M. Cohen：Metal Progress，vol. 69（1952），No. 6，p79
[3] 佐藤智雄編：鉄鋼の顕微鏡写真と解説，丸善，p182（1968）他
[4] A. E. Focke：Iron Age，150（1942），p43
[5] A. F. deRetana and D. V. Doane：Metal Progress，vol. 100（1971）Sept. p65
[6] JISハンドブック①鉄鋼Ⅰ，日本鉄鋼協会，（2006），p708
[7] M. M. Khrushchev：Proc. Conf. Lub. and Wear（1957），p655
[8] 浦野元一，芥川：日立評論，vol. 52（1970）No. 7，654
[9] 澤繁樹，西村富隆，山内直行：日特技報，vol. 11（1976），No. 1，p20

［10］大同特殊鋼：技術資料，No. SD8706a
［11］JISハンドブック①鉄鋼Ⅰ，日本規格協会，（2006），p447
［12］新持喜一郎，浦野元一：塑性と加工，vol. 12（1971），No. 3，229
［13］吉田潤二，勝亦正昭，山崎義夫：鉄と鋼，vol. 84（1998），No. 1，p79
［14］吉田潤二：塑性と加工，vol. 45（2004），No. 527，p59
［15］田部博輔：型技術，vol. 20（2005），NO. 6，p83
［16］尾崎公造：電気製鋼，vol. 76（2005），No. 4，p249
［17］G. A. Roberts，R. A. Cary：Tool Steels 4 th Edition，American Society for Metals，（1992），p58
［18］金沢武，越賀房夫：破壊力学と材料講座 8，脆性破壊 2 = 破壊靭性試験，培風館（1977）
［19］出口喜勇爾，伊藤武：日本金属学会報，vol. 7（1968），No. 9，516
［20］特集/やさしく知る合金元素の役割：特殊鋼，vol. 51（2002），No. 3
［21］G. A. Roberts，R. A. Cary：Tool Steels，4th Edition，American Society for Metals（1980），p222
［22］羽生田智樹：大同特殊鋼社内資料

专栏 3

探索微观世界

模具材料的研发根本在于对其微观组织的控制，也可以说是对微观世界的控制。分辨率是指两根线能够被辨别的极限。人的肉眼约能看清 0. 1mm（10^{-4}m）的物体，放大镜可达到 0. 01mm（10^{-5}m）。超出此极限的材料组织只有靠光学显微镜才能观察，即微米 μm（10^{-6}m）级。本书所介绍的各种显微组织即属于该尺寸范畴。

当需要进一步观察更微细的组织时，要依靠电子显微镜。纳米（10^{-9}m）级的世界要通过特殊的高分辨率的电子显微镜来观察。顺便提及一下，原子的尺寸为 10^{-10}m 级。

当前，通过对纳米世界的控制来实现新材料的研发和利用等技术得到了蓬勃发展，纳米技术一词已为大家所熟悉。

专栏4

用研究者名字命名的显微组织

在本书正文中可发现，微观组织名称中有各种近乎奇怪的称谓，它们几乎是按照对金属组织学做出贡献的研究者的名字命名的。比如，马氏体（马滕斯）、奥氏体（奥斯汀）、贝氏体（贝恩）、索氏体（索尔比）等。

本多光太郎先生是日本金属学的先驱。虽然金属组织名称中没有他的名字，但他对各种金属组织名称的日文汉字译名动了很多脑筋。例如，他把 Pearlite（中文称珠光体）按相近日语发音叫做“波来土”。这是一种铁素体和碳化物的层状组织，因有类似珍珠的光泽而被称为 Pearlite（珠光体）。本多光太郎先生所起的“波来土”译名，还表示层状组织就像沙土被波浪冲打而形成的沙滩波浪纹一样，既生动又形象，无论是音感还是含义，都令人感到十分贴切。

第4章

模具材料面面观

模具材料不仅是日本工业标准 JIS 所规定的工模具钢，从低合金钢到高合金钢以及不锈钢和马氏体时效钢等，还涉及多种材料。

学习了模具材料的知识后可以说对特殊钢有了基本了解。另外，模具材料当中，在 JIS 规定之外，具有厂家特色的品牌钢也较多。这也是模具材料厂家想方设法满足各种需求而努力的结果。接下来，让我们来看看模具材料的方方面面。

4.1 JIS 规定的工具钢

图 4-1 所示为 JIS 手册《铁钢 I》[1] 中的特殊钢分类。在此，首先将特殊钢划分成碳素结构钢或合金结构钢的结构钢（JIS G 4051，JIS G 4053）以及特殊用途钢两大类，进而将特殊用途钢分为工具钢与不锈钢、耐热钢、超合金，还有弹簧钢、易切削钢、轴承钢。

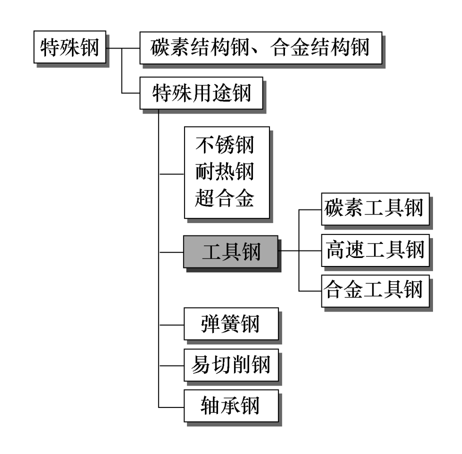


图 4-1　JIS 手册中的特殊钢分类

工具钢又可分为碳素工具钢（Corbon Tool Steels）（JIS G4401）、合金工具钢（Alloy Tool Steels）（JIS G4404）及高速工具钢（High Speed Tool Steels）（JIS G4403）三种，见表 4-1。碳素工具钢及高速工具钢的标准于 1950 年制定，1983 年得到修订；合金工具钢的标准于 1956 年制定，后经过两次修改。其后，因需要与国际标准 ISO 接轨，为配合 ISO/FDIS 4957（1998 年）内容，于 2000 年又进行了修订。

以碳素工具钢 SK105（1.05% C－0.25% Si－0.30% Mn）为基础，各种 JIS 工模具钢的衍生发展及合金元素添加的情况如图 4-2 所示。由此可了解到通过添加各种合金元素，来满足各种需要而形成的 JIS 工模具钢的情况。下面将分别对各钢种加以介绍。

表 4-1　JIS 的工具钢分类（2006 年修订）

分　类	JIS 标准号	典 型 钢 种	
碳素工具钢	G4401	SK85（SK5），SK105（SK3）	
合金工具钢	G4404	主要切削工具钢	SKS2，SKS21
		主要耐冲击工具钢	SKS4，SKS41
	G4404	主要冷作模具钢	SKS3，SKS93，SKD11
		主要热作模具钢	SKT4，SKD61
高速工具钢	G4403	钨系	SKH2
		钼系粉末钢	SKH40
		钼系	SKH51，SKH55，SKH57

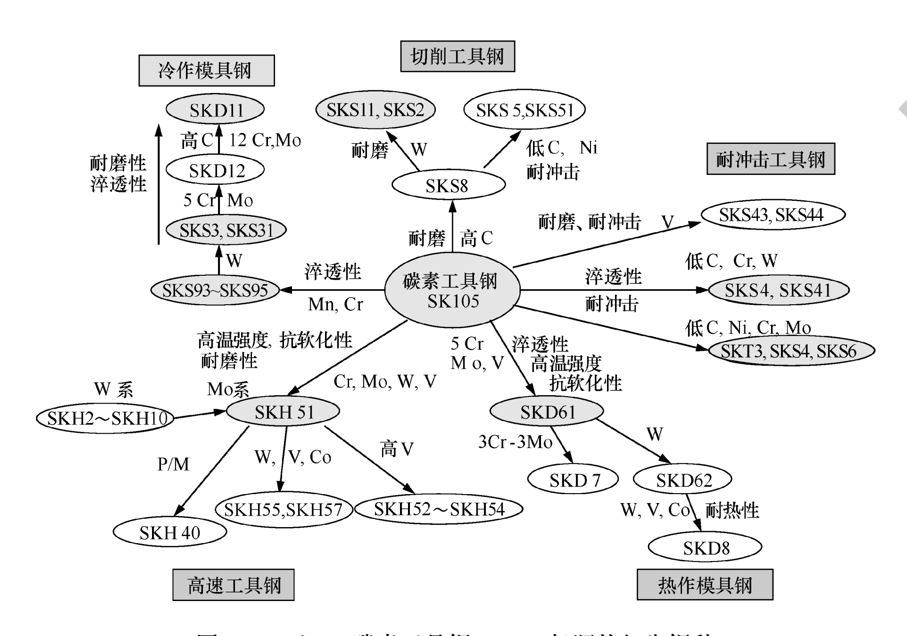


图 4-2　以 JIS 碳素工具钢 SK105 起源的衍生钢种

4.1.1 碳素工具钢（Carbon Tool Steels）[2]

表4-2为JIS G4401中规定的碳素工具钢的化学成分及用途。

表4-2 碳素工具钢的化学成分及用途

牌号	化学成分（质量分数,%）					用途举例（参考）
	C	Si	Mn	P	S	
SK140 (SK1)	1.30 ~ 1.50	0.10 ~ 0.35	0.10 ~ 0.50	≤0.030	<0.030	刀片锉，组锉
SK120 (SK2)	1.15 ~ 1.25	0.10 ~ 0.35	0.10 ~ 0.50	≤0.030	≤0.030	钻头，小冲头，剃刀，锉刀，刀具，锯条，发条
SK105 (SK3)	1.00 ~ 1.10	0.10 ~ 0.35	0.10 ~ 0.50	≤0.030	≤0.030	锯条，錾子，量规，发条，冲模，夹具，刀具
SK95 (SK4)	0.90 ~ 1.00	0.10 ~ 0.35	0.10 ~ 0.50	≤0.030	≤0.030	木工钻头，斧头，錾子，发条，笔尖，雕凿工具，分切刀，冲模，量规，针织用针
SK90	0.85 ~ 0.95	0.10 ~ 0.35	0.10 ~ 0.50	≤0.030	≤0.030	冲模，发条，量规，针
SK85 (SK5)	0.80 ~ 0.90	0.10 ~ 0.35	0.10 ~ 0.50	≤0.030	≤0.030	钢印，冲模，发条，带锯，夹具，刀具，圆锯，量规，针
SK80	0.75 ~ 0.85	0.10 ~ 0.35	0.10 ~ 0.50	≤0.030	≤0.030	钢印，冲模，发条
SK75 (SK6)	0.70 ~ 0.80	0.10 ~ 0.35	0.10 ~ 0.50	≤0.030	≤0.030	钢印，铆钉冲模，圆锯，发条，冲模
SK70	0.65 ~ 0.75	0.10 ~ 0.35	0.10 ~ 0.50	≤0.030	≤0.030	钢印，铆钉冲模，发条，冲模
SK65 (SK7)	0.60 ~ 0.70	0.10 ~ 0.35	0.10 ~ 0.50	≤0.030	≤0.030	钢印，铆钉冲模，冲模，刀片
SK60 (SK6)	0.55 ~ 0.65	0.10 ~ 0.35	0.10 ~ 0.50	≤0.030	≤0.030	钢印，铆钉模，冲模

碳素工具钢中碳的质量分数从 0.55% 到 1.50%，并含有 Si 和 Mn 元素。添加 Si 是出于熔炼的需要，添加 Mn 是为了提高淬透性，其添加量较少。

碳素工具钢淬透性不高，多用于小件产品。一般锉刀和刀具等硬质产品使用 w（C）=1% ~1.4% 的高碳钢，而刻印等需要韧性的产品则用 w（C）=0.9% 的高碳钢，并且淬火时需要水冷。

4.1.2 合金工具钢（Alloy Tool Steel）[3]

表 4-3、表 4-4、表 4-5 分别为 JIS G4404 规定的合金工具钢中用于冷作用途的切削工具钢、耐冲击工具钢、冷作模具钢的化学成分及用途。与碳素工具钢相比，切削工具钢中添加了 Ni、Cr、W、V 等元素。这是因为 Cr、W、V 可形成硬质碳化物，有助于提高耐磨性。

表 4-3 切削工具钢的化学成分及用途

牌号	化学成分（质量分数,%）									用途举例
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	W	V	
SKS11	1.20 ~ 1.30	≤0.35	≤0.50	≤0.030	≤0.030	—	0.20 ~ 0.50	3.00 ~ 4.00	0.10 ~ 0.30	刀具，拉丝模，钻头
SKS2	1.00 ~ 1.10	≤0.35	≤0.50	≤0.030	≤0.030	—	0.50 ~ 1.00	1.00 ~ 1.50	*	丝锥，钻头，刀片，冲模，搓丝模
SKS21	1.00 ~ 1.10	≤0.35	≤0.50	≤0.030	≤0.030	—	0.20 ~ 0.50	0.50 ~ 1.00	0.10 ~ 0.25	
SKS5	0.75 ~ 0.85	≤0.35	≤0.50	≤0.030	≤0.030	0.70 ~ 1.30	0.20 ~ 0.50	—	—	圆锯，带锯
SKS51	0.75 ~ 0.85	≤0.35	≤0.50	≤0.030	≤0.030	1.30 ~ 2.00	0.20 ~ 0.50	—	—	
SKS7	1.10 ~ 1.20	≤0.35	≤0.50	≤0.030	≤0.030	—	0.20 ~ 0.50	2.00 ~ 2.50	*	锯条

（续）

牌号	化学成分（质量分数，%）									用途举例
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	W	V	
SKS81	1.10～1.30	≤0.35	≤0.50	≤0.030	≤0.030	—	0.20～0.50	—	—	替换刃口，刀具，锯条
SKS8	1.30～1.50	≤0.35	≤0.50	≤0.030	≤0.030	—	0.20～0.50	—	—	刀片锉，组锉

注：* 表示 SKS2 和 SKS7，可添加质量分数在 0.2% 以下的 V。

表 4-4　耐冲击工具钢的化学成分及用途

牌号	化学成分（质量分数，%）								用途举例
	C	Si	Mn	P	S	Cr	W	V	
SKS4	0.45～0.55	≤0.35	≤0.50	≤0.030	≤0.030	0.50～1.00	0.50～1.00	0.10～0.30	錾子，冲头，冲剪刀片
SKS41	0.35～0.45	≤0.35	≤0.50	≤0.030	≤0.030	1.00～1.50	2.50～3.50	—	
SKS43	1.00～1.10	0.10～0.30	0.10～0.40	≤0.030	≤0.030	*	—	0.10～0.20	凿岩机活塞，镦锻模
SKS44	0.80～0.90	≤0.25	≤0.30	≤0.030	≤0.030	*	—	0.10～0.25	錾子，镦锻模

注：* 表示可添加质量分数在 0.2% 以下的 V。

在耐冲击工具钢当中，特别是用于韧性要求高的錾子和冲剪刀片等的 SKS4 钢和 SKS41 钢等，其碳的质量分数较低，在 0.35% ～0.55% 范围内。SKS43 钢及 SKS44 钢的含碳量虽然较高，但通过添加 V 元素细化晶粒后提高了耐冲击性，较接近于美国标准的耐冲击钢当中的 AISI S1（0.48% C-0.65% Si-0.25% Mn-0.50% Cr-0.50% W-V）钢种。

表 4-5　冷作模具钢的化学成分及用途

牌号	化学成分（质量分数,%）									用途举例
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	W	V	
SKS3	0.90～1.00	≤0.35	0.90～1.20	≤0.030	≤0.030	0.50～1.00	—	0.50～1.00	—	量规，冲剪刀片，冲模，搓丝模
SKS31	0.95～1.05	≤0.35	0.90～1.20	≤0.030	≤0.030	0.80～1.20	—	1.00～1.50	—	量规，冲模，搓丝模
SKS93	1.00～1.10	≤0.50	0.80～1.10	≤0.030	≤0.030	0.20～0.60	—	—	—	冲剪刀片，量规，冲模
SKS94	0.90～1.00	≤0.50	0.80～1.10	≤0.030	≤0.030	0.20～0.60	—	—	—	冲剪刀片，量规，冲模
SKS95	0.80～0.90	≤0.50	0.80～1.10	≤0.030	≤0.030	0.20～0.60	—	—	—	
SKD1	1.90～2.20	0.10～0.60	0.20～0.60	≤0.030	≤0.030	11.00～13.00	—	—	*	拉丝模，冲模，制砖模，粉末成形模
SKD2	2.00～2.30	0.10～0.40	0.30～0.60	≤0.030	≤0.030	11.00～13.00	—	0.60～0.80	—	
SKD10	1.45～1.60	0.10～0.60	0.20～0.60	≤0.030	≤0.030	11.00～13.00	0.70～1.00	—	0.70～1.00	量规，搓丝模，金属刀具，成形轧辊，冲模
SKD11	1.40～1.60	≤0.40	≤0.60	≤0.030	≤0.030	11.00～13.00	0.80～1.20	—	0.20～0.50	
SKD12	0.95～1.05	0.10～0.40	0.40～0.80	≤0.030	≤0.030	4.80～5.50	0.90～1.20	—	0.15～0.35	

注：*表示可添加质量分数在 0.3% 以下的 V。

在冷作模具钢当中，SKS93 钢、SKS94 钢、SKS95 钢是通过增加 Mn、Cr 来强化淬透性的，SKS3 钢、SKS31 钢则是通过增加 W 来形成硬质碳化物从而提高耐磨性的。SKS 钢也被称为低合金工具钢或特殊工具钢。

称为 SKD 的模具钢是 $w(C)=1\%\sim2\%$、$w(Cr)=5\%$ 或 $w(Cr)=12\%$、$w(Mo)\approx1\%$，并添加少量 V 的钢种。其目的在于提高淬透性及靠碳化物弥散分布来增强耐磨性。

热作模具钢的化学成分及用途见表 4-6。因为需要耐冲击性及提高反复加热冷却引起的热疲劳性能，所以采用中碳钢。为提高淬透性及增强耐氧化性而添加 Cr，为提升高温强度和抗软化能力而添加 Mo 和 W。5% Cr-1% Mo 系的 SKD6、SKD61、SKD62 等是较为常用的钢种。另外，3% Cr-3% Mo 系的 SKD7，含 W 的 SKD4 和 SKD5，以及含 V 和 Co 的 SKD8 则主要是改善高温强度的钢种。

以 SKT4 为主的中 C-Ni-Cr-Mo 钢，原本就是高韧性材料，用于制作锤锻模。

与碳素工具钢相比，低合金的切削工具钢和耐冲击钢的淬火温度几乎相同，而高合金的冷作模具钢及热作模具钢的淬火温度则较高。其原因是后者需要通过高温使退火状态存在的碳化物固溶。

4.1.3 高速工具钢（High Speed Tool Steels）[4]

表 4-7 所示为 JIS G4403 标准中的高速工具钢的化学成分及用途。其中，SKH2 ~ SKH10 是钨系高速工具钢，SKH40 是粉末冶金制钼系高速工具钢，SKH50 ~ SKH59 是钼系高速工具钢。钨系高速工具钢虽起源于 18-4-1（18% W-4% Cr-1% V）系钢，但现在几乎被钼系取代，只剩一些特殊用途。SKH40 钢是利用粉末冶金方法制造的高速工具钢。采用粉末冶金方法，即使是一般熔炼法不能实现的高碳及含多量碳化物形成元素成分的钢也可制造，从而可得到碳化物分布更加均匀、更富有耐磨性和韧性的钢种。

钼系高速工具钢中最常用的是 SKH51 钢，是与化学成分为 0.85% C-4% Cr-5% Mo-6% W-2% V 的 AISI M2 钢相近的钢种。钼系高速工具钢中还包括通过添加碳化物形成元素提升回火硬度的钢种，以及通过添加 Co 元素来增强耐热性的用于重切削的高速工具钢。

这些钢种的淬火温度均超过 1200℃，回火温度也较高，经热处理后硬度可达 64HRC 以上，应用于切削刀具及需要韧性的各种工具。

表 4-6　热作模具钢的化学成分及用途

牌号	化学成分（质量分数,%）											用途举例
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	W	V	Co	
SKD4	0. 25 ~0. 35	≤0. 40	≤0. 60	≤0. 030	≤0. 020	—	2. 00 ~3. 00	—	5. 00 ~6. 00	0. 30 ~0. 50	—	冲模，压铸模，挤压模，冲裁刀片
SKD5	0. 25 ~0. 35	0. 10 ~0. 40	0. 15 ~0. 45	≤0. 030	≤0. 020	—	2. 50 ~3. 20	—	8. 50 ~9. 50	0. 30 ~0. 50	—	
SKD6	0. 32 ~0. 42	0. 80 ~1. 20	≤0. 50	≤0. 030	≤0. 020	—	4. 50 ~5. 50	1. 00 ~1. 50	—	0. 30 ~0. 50	—	
SKD61	0. 35 ~0. 42	0. 80 ~1. 20	0. 25 ~0. 50	≤0. 030	≤0. 020	—	4. 80 ~5. 50	1. 00 ~1. 50	—	0. 80 ~1. 1 5	—	
SKD62	0. 32 ~0. 40	0. 80 ~1. 20	0. 20 ~0. 50	≤0. 030	≤0. 020	—	4. 75 ~5. 50	1. 00 ~1. 60	1. 00 ~1. 60	0. 20 ~0. 50	—	冲模，挤压模
SKD7	0. 28 ~0. 35	0. 10 ~0. 40	0. 15 ~0. 45	≤0. 030	≤0. 020	—	2. 70 ~3. 20	2. 50 ~3. 00	—	0. 40 ~0. 70	—	
SKD8	0. 35 ~0. 45	0. 15 ~0. 50	0. 20 ~0. 50	≤0. 030	≤0. 020	—	4. 00 ~4. 70	0. 30 ~0. 50	3. 80 ~4. 50	1. 70 ~2. 10	4. 00 ~4. 50	冲模，压铸模，挤压模
SKT3	0. 50 ~0. 60	≤0. 35	≤0. 60	≤0. 030	≤0. 020	0. 25 ~0. 60	0. 90 ~1. 20	0. 30 ~0. 50	—	*	—	锻模，冲模，挤压模
SKT4	0. 50 ~0. 60	0. 10 ~0. 40	0. 60 ~0. 90	≤0. 030	≤0. 020	1. 50 ~1. 80	0. 80 ~1. 20	0. 35 ~0. 55	—	0. 05 ~0. 15	—	
SKT6	0. 40 ~0. 50	0. 10 ~0. 40	0. 20 ~0. 50	≤0. 030	≤0. 020	3. 80 ~4. 30	1. 20 ~1. 50	0. 15 ~0. 35	—	—	—	

注：* 表示 SKT3 可添加质量分数在 0. 20% 以下的 V。

表 4-7　高速工具钢的化学成分及用途

牌号	化学成分（质量分数,%）										用途举例
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	W	V	Co	
SKH2	0.73~0.83	≤0.45	≤0.40	≤0.030	≤0.030	3.80~4.50	—	17.20~18.70	1.00~1.20	—	一般切削用刀具及其他各种工具
SKH3	0.73~0.83	≤0.45	≤0.40	≤0.030	≤0.030	3.80~4.50	—	17.00~19.00	0.80~1.20	4.50~5.50	高速重切削用刀具及其他各种工具
SKH4	0.73~0.83	≤0.45	≤0.40	≤0.030	≤0.030	3.80~4.50	—	17.00~19.00	1.00~1.50	9.00~11.00	难切削用刀具及其他各种工具
SKH10	1.45~1.60	≤0.45	≤0.40	≤0.030	≤0.030	3.80~4.50	—	11.50~13.50	4.20~5.20	4.20~5.20	高难切削用刀具、工具及其他各种工具
SKH40	1.23~1.33	≤0.45	≤0.40	≤0.030	≤0.030	3.80~4.50	4.70~5.30	5.70~6.70	2.70~3.20	8.00~8.80	需要硬度、韧性、耐磨性的一般切削用刀具及其他各种工具
SKH50	0.77~0.87	≤0.70	≤0.45	≤0.030	≤0.030	3.50~4.50	8.00~9.00	1.40~2.00	1.00~1.40	—	需要韧性的一般切削刀具及其他各种工具
SKH51	0.80~0.88	≤0.45	≤0.40	≤0.030	≤0.030	3.80~4.50	4.70~5.20	5.90~6.70	1.70~2.10	—	

（续）

牌号	化学成分（质量分数,%）										用途举例
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	W	V	Co	
SKH52	1.00~1.10	≤0.45	≤0.40	≤0.030	≤0.030	3.80~4.50	5.50~6.50	5.90~6.70	2.30~2.60	—	较需要韧性的高速切削刀具及其他各种工具
SKH53	1.15~1.25	≤0.45	≤0.40	≤0.030	≤0.030	3.80~4.50	4.70~5.20	5.90~6.70	2.70~3.20	—	
SKH54	1.25~1.40	≤0.45	≤0.40	≤0.030	≤0.030	3.80~4.50	4.20~5.00	5.20~6.00	3.70~4.20	—	高硬材切削用刀具及其他各种工具
SKH55	0.87~0.95	≤0.45	≤0.40	≤0.030	≤0.030	3.80~4.50	4.70~5.20	5.90~6.70	1.70~2.10	4.50~5.00	较需要韧性的高速重切削刀具及其他各种工具
SKH56	0.85~0.95	≤0.45	≤0.40	≤0.030	≤0.030	3.80~4.50	4.70~5.20	5.90~6.70	1.70~2.10	7.00~9.00	
SKH57	1.20~1.35	≤0.45	≤0.40	≤0.030	≤0.030	3.80~4.50	3.20~3.90	9.00~10.00	3.00~3.50	9.50~10.50	高硬切削用刀具及其他各种工具
SKH58	0.95~1.05	≤0.70	≤0.40	≤0.030	≤0.030	3.50~4.50	8.20~9.20	1.50~2.10	1.70~2.20	—	需要韧性的一般切削刀具及其他各种工具
SKH59	1.05~1.15	≤0.70	≤0.40	≤0.030	≤0.030	3.50~4.50	9.00~10.00	1.20~1.90	0.90~1.30	7.50~8.50	高速重切削以及其他要求工具韧性的场合

注：各钢种的杂质铜的质量分数不得超过0.25%

4.2 用作模具材料的品牌钢

接下来按用途对模具材料进行介绍。JIS 标准将工具钢仅分为碳素工具钢、合金工具钢和高速工具钢三种，但该分类所规定的钢种也常被用于其他用途。另外，像塑料模具钢等，虽然 JIS 标准没有该名称的分类，但它涉及的钢种既包括碳素钢又包括不锈钢较为广泛，所以仍按三种来划分。

从日本国内的模具材料种类来看，冷作模具钢和热作模具钢主要是 JIS 标准中的 SKD11 钢和 SKD61 钢。不过，即使属于 JIS 钢种，也有按生产厂家命名的钢。另外，厂家在 JIS 钢种的基础上进行改良以及开发出的新成分的钢种，都被冠以各自的品牌钢名称。这一点不仅在日本国内，在国外也同样如此。

由于模具的使用环境苛刻，为了尽可能发挥模具钢的特性，在研制材料时既要考虑主要成分，又要考虑控制化学成分比例、控制杂质成分、精炼技术、锻造和轧制等制造方法以及热处理条件等。各厂家的品牌材料中就蕴含着这些独到之处。

值得注意的是，近些年出现了不具备品牌商标权的厂家生产产品后，冠以其他厂家的商标进行销售的现象。这是侵犯品牌厂家的权益，违背职业道德的违法行为。作为特殊钢行业的工作者，切记不可效仿。

下文在按用途分别介绍模具材料时，虽然仍以 JIS 钢为中心展开，但也会根据需要对已定型的企业品牌予以介绍，并附上各钢种的品牌对照表。

4.3 冷作模具钢

4.3.1 损伤形式与性能要求

模具用于冷加工时，加工对象材料处于常温状态。模具大致

分为冲模和锻模，并根据所受载荷形式又分为成形加工（造型）、剪切加工（冲裁）、弯曲加工、拉深加工、压缩加工。无论哪种加工方式，模具所受作用力都分为压缩应力、拉伸应力和剪切应力，结果因磨损、粘附、崩角甚至开裂导致模具失效的实例较多。

图 4-3 所示为冷作模具的损伤形式，针对各种加工方法按损伤的难易顺序表示。总的说来，其主要的损伤形式为凹模和冲头的尖角及拐角接触导致的磨损、崩角及开裂。开裂又有以缺损为起点和以疲劳开裂为起点之分。此外，在冲裁（穿孔）时，有时也会因冲头强度不足而产生变形。

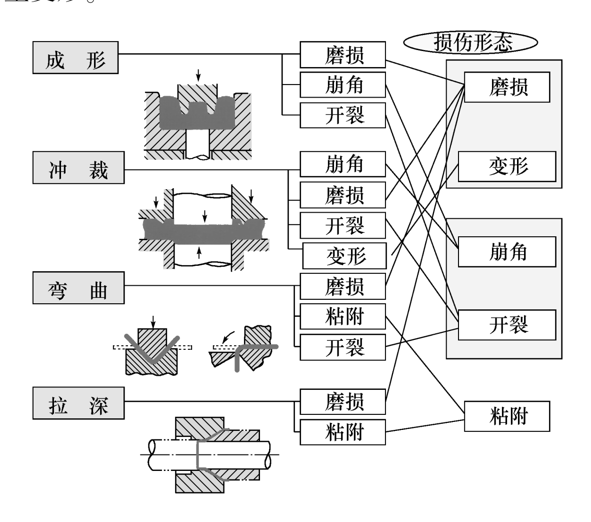


图 4-3　冷作模具的损伤形式

对模具材料来说，重要的是要具备抵抗这些损伤的性能。针对上述各种损伤形式的冷作模具材料的性能要求如图 4-4 所示。首先模具需要能承受机械加工中的各种应力，即拉伸、压缩、扭转应力等。虽然是冷加工，但也会因加工变形热引起表面升温，所以要求模具材料有抗软化性。耐磨性基本上可认为与硬度成正比。另外，为抑制缺损（崩角）及随之而来的开裂，也需要模具材料具备一定的韧性。从模

具制作角度考虑，模具材料还需要有切削加工性能、热处理性能、经济性等。

模具材料的这些特性取决于化学成分和热处理的组合，以及对基体特性以及碳化物的类型、大小、含量的控制，并决定着模具的最终性能。

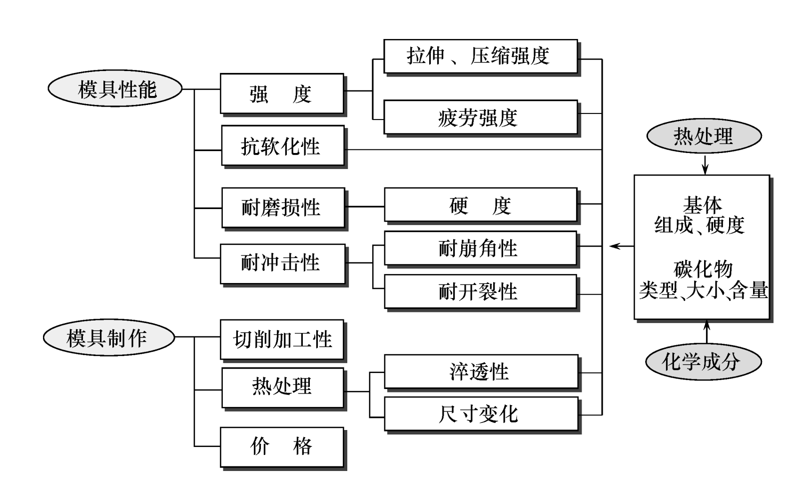


图 4-4　冷作模具材料的性能要求

4.3.2　冷作模具钢的化学成分与性能定位

主要冷作模具钢的化学成分及热处理性能分别见表 4-8 及表 4-9。其中包括了富有代表性的 JIS 钢种及其改善钢种。另外，各厂家的冷作模具钢牌号对照表见表 4-10[5]。再有，高速工具钢在冷作模具及热作模具中均有使用，因此将其对照表列于表 4-11[6]。

这些钢的性能定位如图 4-5 所示，即以强度、耐磨性及与其性能相反的韧性为坐标，对各钢种进行了定位。一般而言，硬度和耐磨性越高，则韧性越有降低的倾向，亦即右侧下滑倾向。然而，有些独特的钢种即使在同等硬度下也会显现出较高的韧性。下面分别对各钢种群的典型钢种和独特钢种进行说明。

表 4-8　主要冷作模具钢的化学成分

钢种分类		牌号		化学成分（质量分数,%）						
		JIS	大同	C	Mn	Cr	Mo	W	V	Co
碳素工具钢	水淬钢	SK105	YK3	1.05	0.25	—	—	—	—	—
合金工具钢	油淬钢	SKS93	YK30	1.05	1.05	0.40	—	—	—	—
	耐冲击钢	SKS4	GS4	0.50	≤0.50	0.75	—	0.75	—	—
		SKS41	GS41	0.40	≤0.50	1.25	—	3.00	—	—
	火焰淬火钢	—	GO5	0.75	0.85	2.00	0.30	—	—	—
	冷作模具钢	SKS3	GO3	0.95	1.05	0.75	—	0.75	—	—
		SKS3改	GOA	0.87	1.10	0.50	—	0.50	—	—
		—	GO4	0.85	2.00	1.00	1.40	—	—	—
	预硬钢	—	GO40F	0.28	1.20	2.50	0.40	—	0.20	—
	5Cr 冷作模具钢	SKD12	DC12	1.00	0.60	5.15	1.05	—	0.25	—
	8Cr 冷作模具钢	—	DC53	0.90	0.40	8.00	2.00	—	0.30	—
	基体型冷作模具钢	—	DCMX	7Cr-Mo 系基体钢（含易切削元素）						
	12Cr 冷作模具钢	SKD11	DC11	1.50	≤0.60	12.00	1.00	—	0.35	—
高速工具钢	一般用途	SKH51	MH51	0.84	≤0.40	4.15	4.95	6.30	1.90	—
	基体钢	—	DRM3	0.8	—	5.50	$2w(Mo)+w(W)=10\%$		1.00	
	粉末高速工具钢	SKH40	DEX40	1.28	≤0.40	4.15	5.00	6.20	2.95	8.40

表 4-9　主要冷作模具钢的热处理性能

牌号		热处理温度/℃			硬度	
JIS	大同	退火	淬火	回火	退火 HB	淬火和回火 HRC
SK105	**YK3**	750～780 缓冷	760～820 水冷	150～200 空冷	≤212	≥63
SKS93	**YK30**	750～780 缓冷	790～850 油冷	150～200 空冷	≤217	≥63
SKS4	**GS4**	740～780 缓冷	830～880 油冷	150～200 空冷	≤201	≥56

（续）

牌号		热处理温度/℃			硬度	
JIS	大同	退火	淬火	回火	退火HB	淬火和回火HRC
SKS41	GS41	760～820缓冷	850～900油冷	150～200空冷	≤217	≥53
—	GO5	火焰淬火钢			≤217	55～60
SKS3	GO3	750～800缓冷	800～850油冷	150～200空冷	≤217	≥60
SKS3改	GOA	750～800缓冷	800～850油冷	150～200空冷	≤217	≥60
—	GO4	750～800缓冷	830～870油冷	150～200空冷	≤248	≥61
—	GO40F	预硬钢（40HRC）				
SKD12	DC12	830～880缓冷	930～980空冷	150～200空冷	≤255	≥61
—	DC53	830～880缓冷	1020～1040空冷	150～200空冷	≤255	≥61
				520～530空冷		≥62
—	DCMX	830～880缓冷	1000～1050空冷	150～200空冷	≤235	60～61
				480～560空冷		56～62
SKD11	DC11	830～880缓冷	1020～1040空冷	150～200空冷	≤255	≥61
				520～530空冷		≥56
SKH51	MH51	800～880缓冷	1190～1220油冷，盐浴	540～570空冷	≤255	≥63
—	DRM3	800～880缓冷	1100～1140油冷，盐浴	550～620空冷	≤235	≥62
SKH40	DEX40	800～830缓冷	1180～1220油冷，盐浴	560～600空冷	≤285	≥64

注：空冷的钢种可采用真空淬火。

1. 碳素工具钢及低合金工具钢

以SK105钢为代表的碳素工具钢，因淬透性较低，限于制作小型模具，淬火时需要水冷。另一方面，由于低淬透性使其不能淬硬到心部，仅表面达到硬化，所以SK105钢可制得心部富有韧性的模具。

通过添加Cr、Mn合金元素对淬透性进行改善的钢种是SKS93钢，使油冷淬火成为可能。另外，为使SKS3钢具有多种用途而调整成分对其进行改良，使其成为SKS系通用钢种，即0.87%C-1%

表 4-10　冷作模具钢牌号对照表

分类	JIS	AISI	爱知	山阳	大同	高周波	日立	不二越	Uddeholm	Boehler
碳素工具钢	SK105	W1	SK3	QK3	YK3	K3	YC3			K990
	SKS93		SK301	QKSM	YK30	K3M	YCS3			
	SKS3		SKS3	QKS3	GOA	KS3	SGT		ARNE	K460
	SKD1	D3		QC11	DC1	KD1	CRD		SVERKER3	K100，K107
	SKD11	D2	SKD11	QC11	DC11	KD11	SLD	CDS11	SVERKER21	K105，K110
	SKD11-M		AUD15 AUD11	QCM7， QCM8	DC53	KD11S KD21	SLD8	MDS9	SLEIPNER	K340
	中 Cr SKD						ARK1			
	SKD12	A2	SKD12		DC12	KD12			RIGOR	K305
合金工具钢	预硬 40HRC				GO40F	KAP65	HPM-MAGIC		IMPAXHH	
	预硬≥50HRC									
	火焰淬火		SX105V，SX4	QF3	GO5	FH5， KRCX	HMD5		FERNO	
	空冷 SKS				GO4	KSM	ACD37			
	耐冲击钢		AKS4	QF1	GS5	KTV5	YSM			
	其他		SXACE AUD11X		DCMX	NOGA	SLD10 SLD-MAGIC	ICS22	CALMAX CALDIE ELMAX VANCRON40 VANADIS4E VANADIS6 VANADIS10	K390 K890

（续）

分类	JIS	AISI	爱知	山阳	大同	高周波	日立	不二越	Uddeholm	Boehler
高速 工具钢	SKH51	M2		QH51	MH51	H51	YXM1	SKH9		S600
	SKH51 等							SKH9D， DURO-MX		S705
	SKH55 等				MH55	HM35	YXM4	HM35 HS53M		
	SKH57 等				MH8	MV10	XVC5	H93R DURO-SP		S700
	基体型			QHZ	DRM1 DRM2 DRM3	KMX1 KMX2 KMX3	YXR33 YXR3 YXR7	DURO-F1，DURO-F3 DURO-F7，DURO-V2 DURO-V5	CALDIE，UNIMAX	W360
粉末高速 工具钢	SKH40				DEX40		HAP40	FAX38	ASP30	S590
	基体型				DEX-M1 DEX-M3		HAP5R			
	其他			SPM23 SPM30 SPM60 SPMR8	DEX20 DEX60		HAP10 HAP50 HAP72	FAX31 FAX55 FAXG2	ASP23 ASP60	S290 S390 S690 S790

表 4-11　高速工具钢牌号对照表

分类	JIS	AISI	山阳	大同	高周波	日立	不二越	Uddeholm	Boehler
钨系	SKH2	T1		WH2	H2	YHX2	SKH2		S200
	SKH3	T4		WH3	H3		SKH3		
	SKH4	T5		WH4	H4		SKH4		
	SKH10	T15		VH10	HV5				
钼系	SKH51	M2	QH51	MH51	H51	YXM1	SKH9		S600
	SKH52	M3-1		MH52	H52				
	SKH53	M3-2		MH53	HV1				S607
	SKH54	M4		MH54	HV2		HM4		
	SKH55			MH55	HM35	YXM4	HM35		S705
	SKH56	M36		MH56	HM36		HM36		
	SKH57			MH57，MH8	HV10	XVC5	HS93R		S700
	SKH58	M7		MH7	HM3		HM7		S400
	SKH59	M42		MH59	HM42	YXM42	HM42		S500

（续）

分类	JIS	AISI	山阳	大同	高周波	日立	不二越	Uddeholm	Boehler
钼系	其他			MH64 MH69	S70	YXM27 YXM60	HS97R HM1， HMT12， HM33 SKH9D FM38V		
基体型	基体型		QHZ	DRM1 DRM2 DRM3	KMX1 KMX2 KMX3	YXR33 YXR3 YXR7	DURO-F1 DURO-F3 DURO-F7 DURO-V2 DURO-V5		
粉末系	SKH40		SPM30	DEX40			FAX38	ASP30	S590
	其他		SPM23 SPM60 SPMR8	DEX20 DEX60 DEX61 DEX-M1 DEX-M3		HAP10 HAP50 HAP72 HAP5R	FAX31 FAX55 FAXG2	ASP23 ASP60	S690 S790 S390

Mn-0.5%Cr-0.5%W 钢 GOA（大同特殊钢品牌）。在减少 Cr、W 的同时，添加特殊元素来抑制淬火时的晶粒粗大，从而使稳定热处理得以实现。还有 Mn 的质量分数为 2% 的 0.85%C-2%Mn-1%Cr-1.4%Mo 钢 GO4（大同特殊钢品牌），是空冷也可淬硬的淬透性极佳的 SKS 系钢。

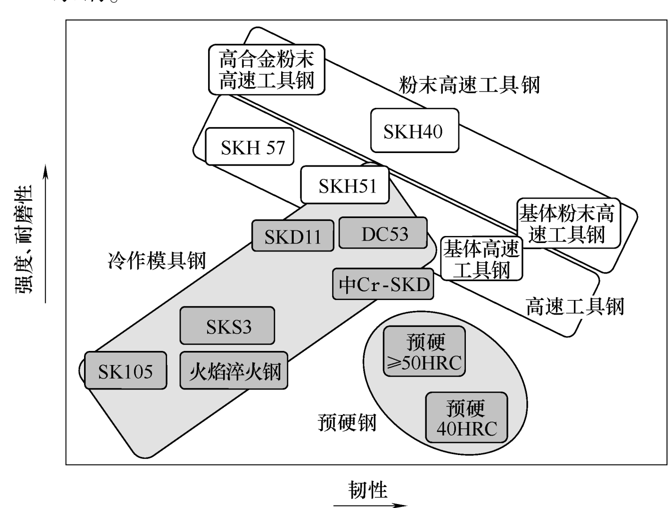


图 4-5 冷作模具钢的性能定位

预硬钢预先经热处理后硬度已达到 40HRC 左右，如该硬度可满足要求，则在模具加工中无须再进行热处理，刻模后即可直接交付使用。另外，随着切削加工设备及切削刀具的进步，使 50HRC 级预硬钢的使用也得到尝试[7,8]。

火焰淬火钢是用火焰只加热冲裁模的刃部，然后经空冷淬硬的材料。火焰加热时，为防止因过热而产生过多的残留奥氏体，将含碳量稍稍降低；为提高淬透性，添加锰、铬、钼等元素。火焰淬火钢虽然对承受较大负荷有一定限度，但对承受负荷小的模具来说是很实用的钢种。

2. 高铬-高碳合金工具钢

化学成分在 $w(\mathrm{C})=1\%$、$w(\mathrm{Cr})=5\%$ 以上的钢种称为高碳-高铬

工具钢或冷作模具钢。虽然 SKD12 钢在日本国内几乎没有得到普及，但在美国作为 AISI A2 钢种目前仍在广泛使用。日本使用最为普遍的模具钢是 SKD11（12% Cr 系）钢。还有通过提升含碳量来增加碳化物含量，进而满足砖模及粉末成形用模要求的钢种 SKD1 钢，被用于有上述需求的场合。

冷作模具钢在日本国内的发展过程如图 4-6 所示。SKD11 钢起始于 1940 年奥地利 BOEHLER（百禄）的 Spezial-K，但到 1960 年应用于滚丝轮之后才在市场上站稳脚跟。1980 年以后，8% Cr-2% Mo 系的模具钢作为 SKD11 钢的改良钢种也逐渐形成了固定市场。

当前，企业对工模具钢也注重降低加工成本，为提高切削性而添加硫元素[9]，并开发高温回火热处理尺寸变化较小[10]且碳化物微细化的工模具钢。DCMX 钢（大同品牌）即为其中之一，不但便于模具制造，而且因韧性较好，适用于易发生崩角的模具[11]。

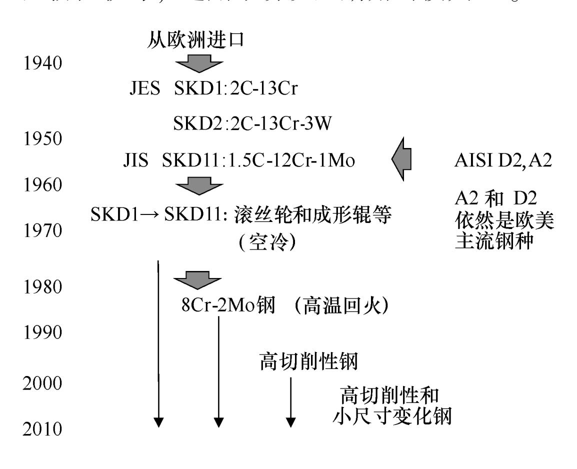


图 4-6 冷作模具钢的发展过程

3. 基体高速钢

高速工具钢的一次碳化物虽能增强耐磨性，但也成为降低韧性和疲劳强度的原因。将其用于模具材料时，不仅要求其有耐磨性，具备韧性和疲劳强度也同样重要，因此需要一次碳化物呈弥散分布。所谓

基体高速钢，即是化学成分接近 SKH51 等通用高速工具钢的基体组成，淬火后粗大的一次碳化物几乎消失或呈弥散分布的钢种。

问世较早的类似钢种中有美国 VASCO（Vanadium Alloy Steel Company）公司开发的钢种[12]，日本国内则是日立金属的 YXR 系列钢较早得到了普及和应用[13]。此外，最近大同特殊钢厂开发出了可广泛用于冷作应用领域的 DRM1、DRM2、DRM3 钢。DRM3 钢的淬透性高于 SKH51 钢，而且硬度可达 62～66HRC，即使采用真空淬火也可淬硬[14,15]。

4.3.3 冷作模具钢的性能

典型的冷作模具钢的淬火温度与硬度的关系如图 4-7 所示。不同钢种群的最佳淬火温度相差较大，碳素工具钢及低合金工具钢为 800～850℃，冷作模具钢为 1020～1040℃，高速工具钢 SKH51 要达 1220℃。淬火温度过低时不能得到较高的硬度，而淬火温度过高又会使残留奥氏体增多及晶粒粗大，故选择合适的热处理温度十分重要。

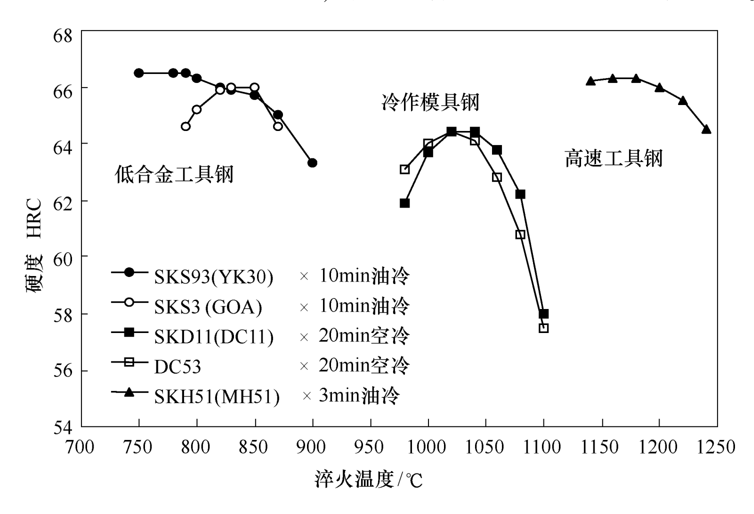


图 4-7　冷作模具钢的淬火温度与硬度的关系

作为钢的淬透性研究实例，SK105、SKS3 改良钢 GOA（大同品牌）、SKD 系的 SKD11 钢和 DC53 钢（大同品牌）的连续冷却转变图

如图 4-8 所示。模具钢是空冷淬硬钢，如按照分析结构钢淬透性的乔米尼曲线来表示的话，则都会变成直线看不出差异，而用连续冷却转变图可看出珠光体及贝氏体转变区域的变化，由此可明确判断模具钢淬透性的优劣。

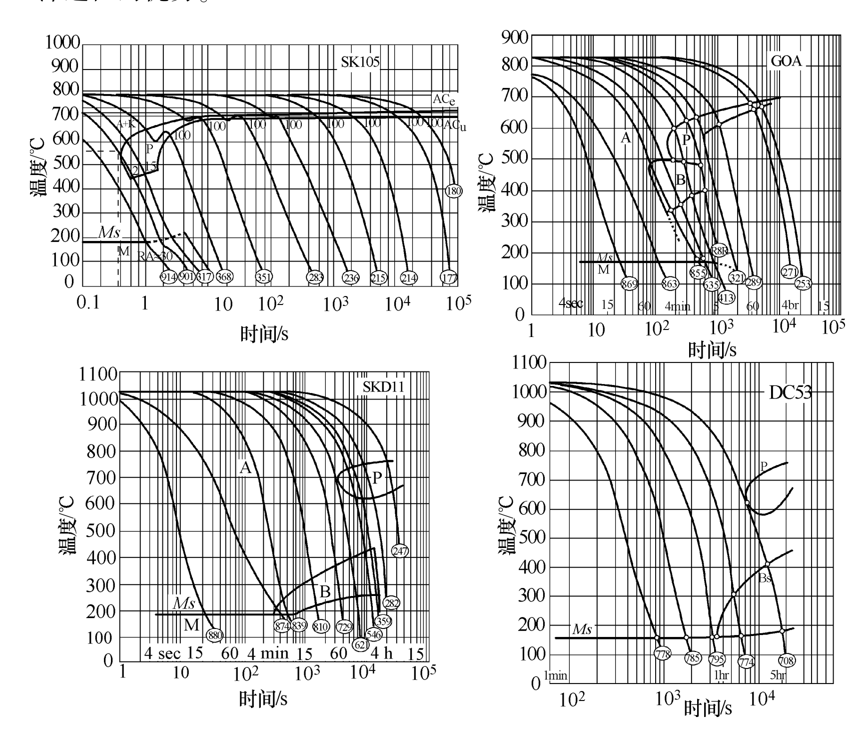


图 4-8　冷作模具钢的淬透性（连续冷却转变图）

图 4-9 所示为具有代表性的冷作模具钢的回火硬度曲线。虽然其淬火硬度如前所述取决于含碳量，但回火硬度受合金元素的影响较大。低合金工具钢的硬度随回火温度的上升而逐渐下降，而高合金工具钢及高速工具钢的硬度则在 500℃左右回火时有再上升的特点。这一现象被称为二次硬化，是由于在该温度下产生的微细碳化物 VC 及 Mo_2C 析出硬化所致。

图 4-10 所示为冷作模具钢和高速工具钢的显微组织。SKD11 钢

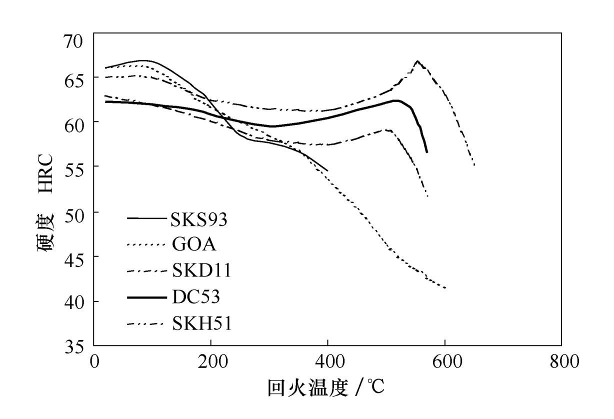
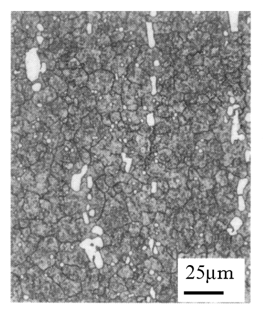


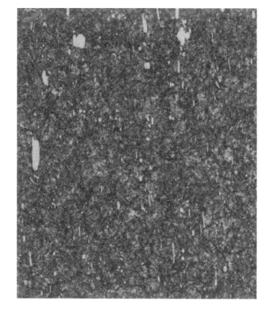
图 4-9　冷作模具钢的回火硬度曲线

为低温回火组织，8% Cr-2% Mo（DC53）钢为高温回火组织。SKD11 钢呈现一次粗大碳化物与微细球状碳化物的混合组织，而 8% Cr-2% Mo（DC53）钢的粗大碳化物含量则较少。两种钢的碳化物类型均为 $(Cr, Fe)_7C_3$。

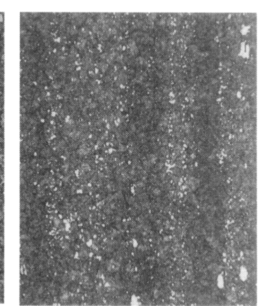
高速工具钢 SKH51 的碳化物分布也比 SKD11 钢细小均匀，其碳化物类型以 $(Fe, Mo)_6C$ 为主。



冷作模具钢 SKD11
淬火:1030℃,空冷
回火: 180℃
硬度: 61.5 HRC



冷作模具钢 DC53
淬火:1030℃,空冷
回火: 530℃
硬度: 62.7 HRC



高速工具钢SKH51
淬火:1220℃,油冷
回火: 560℃
硬度: 65.4 HRC

图 4-10　冷作模具钢和高速工具钢的显微组织

为分析典型钢种的力学性能，分别给出冲击韧度和疲劳性能，如图4-11和图4-12所示。如图4-11所示，随着硬度的上升冲击韧度下降，而在相同硬度下，DC53钢的冲击韧度高于SKD11钢，基体高速钢DRM3高于普通高速工具钢SKH51，即碳化物越细小，冲击韧度越高。

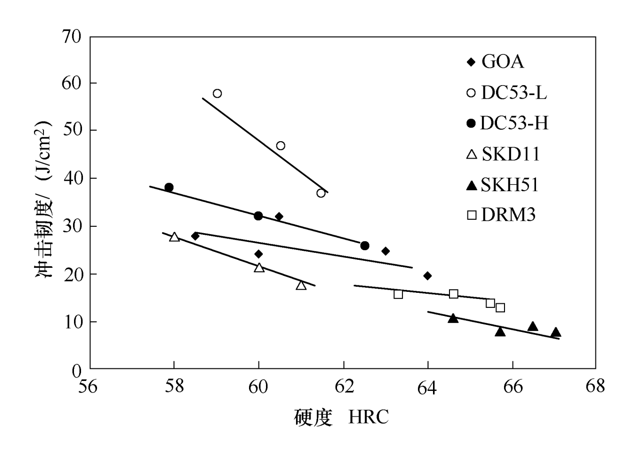


图4-11 冷作模具钢的冲击韧度

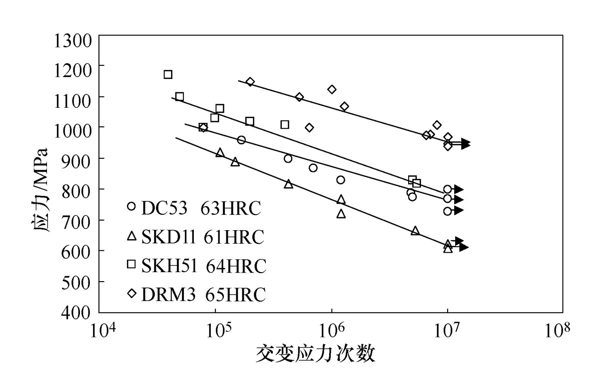


图4-12 冷作模具钢的疲劳性能（回转弯曲试验，光滑试样）

图4-12所示为常用硬度下的冷作模具钢的疲劳性能。一次碳化物最细小的基体高速钢的疲劳强度最高，有粗大碳化物的SKD11钢则较低。

8% Cr-2% Mo 钢作为替代 SKD11 钢的改良钢种，已形成稳定的市场[16]。图 4-13 所示为该钢种的特点。该钢种最早是由日本开发的，现在欧美国家也在制造同类的钢种。钢中的一次碳化物呈均匀弥散分布，所以在模具加工时表现出了良好的切削加工性和出色的研磨性，在使用中可抑制碳化物引起的裂纹，从而显出高韧性和高疲劳性能。

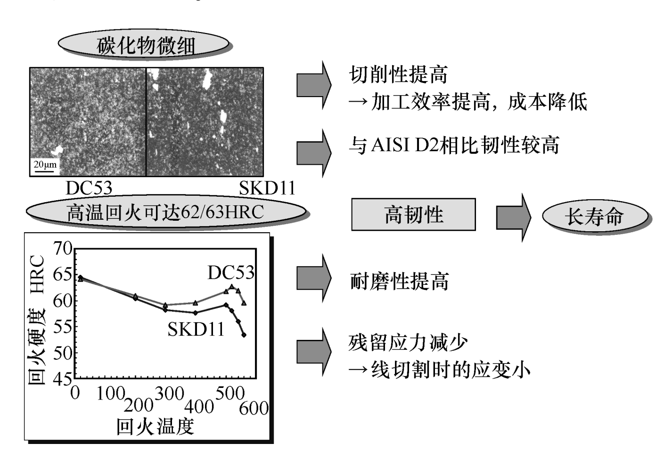


图 4-13　8Cr-2Mo 系冷作模具钢的特点

其另一特点是在 500～540℃高温回火时硬度能达到 62HRC 以上，这是 SKD11 钢所不能及的。SKD11 钢通常在 150～200℃的回火硬度可达 61HRC 左右，而高温回火硬度低于 60HRC。因此，采用线切割加工各种冲头和模具时，对 8% Cr-2% Mo 钢进行高温回火后，其残留应力较小，加工后的变形也小，而且还可得到较高的硬度。

在高温回火后使用 8% Cr-2% Mo 钢时，其缺点是热处理后尺寸变化比较明显。前述基体系冷作模具钢中的 DCMX 钢（大同品牌）改善了这一不足，不但尺寸变化较小，而且各向异性也较小。其具体比较数据如图 4-14[11] 所示。

另外，高温回火后使用的钢种，会在使用时发生微米级的尺寸变化，所以需要对此时效尺寸变化施以对策。时效尺寸变化的原因，是

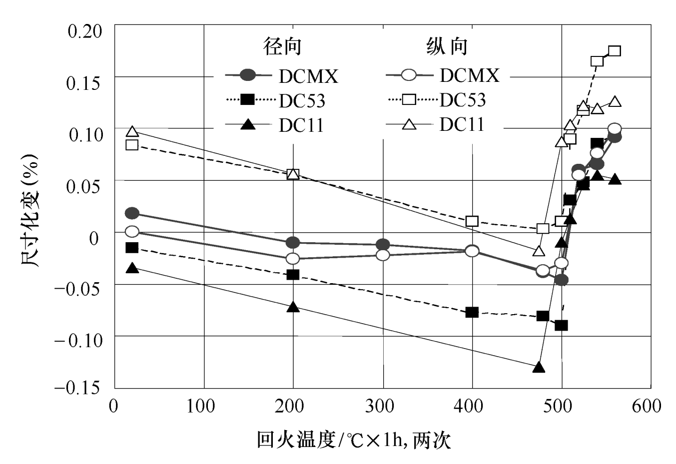


图 4-14 DCMX 钢的热处理尺寸变化

由于高温回火后，即使残留 3% ~5% 的微量残留奥氏体，也会因其处于不稳定状态而随着时间的推移发生马氏体转变。即使施以深冷处理，残留奥氏体也不能完全分解，所以不能彻底解决问题。低温回火时，虽然有 20% 的残留奥氏体，但因其状态稳定，不产生时效变化。

为使奥氏体稳定，可行的解决办法是追加 400℃ 稳定化回火。另外，如果用更高温度的回火让残留奥氏体完全分解，虽然不会产生奥氏体不稳定问题，但却达不到高硬度。因此，应根据性能要求选用恰当的回火温度。时效尺寸变化的防止对策如图 4-15[17] 所示。

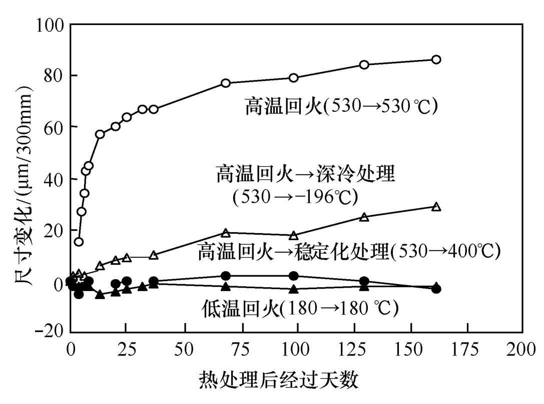


图 4-15 时效尺寸变化的防止对策

4.3.4 冷作模具钢的选用方法

表 4-12 为冷作模具钢的选用方法。选用时需考虑加工方法、应力状态、成形加工对象的材料性质、生产数量、板材厚度等，此外模具的大小及尺寸精度也是不可忽略的因素。

负荷较小或小批量生产时使用低合金工具钢（SKS），负荷较大或大批量生产时使用冷作模具钢（SKD），负荷更大时选用高速工具钢及粉末高速工具钢。

适用于耐磨场合的有冷作模具钢、高速工具钢及高合金高速工具钢，适用于耐冲击场合的有 8Cr-2Mo 系模具钢和基体型高速工具钢。

4.3.5 冷作模具的未来发展趋势

工业产品的最终目标是在充分确保质量和功能的前提下设法降低单位成本，因此对模具寿命有较高要求。在产品更新换代周期缩短的情况下，为及时制造出模具就要缩短工期，这倾向于通过改善切削性来实现。另外，为压缩热处理工序的工期，与切削加工设备及切削刀具的改进相结合，高硬度预硬钢的应用也在不断增多。

从目前来看，用于汽车的冲压钢板呈现高强度化的趋势[18]。为实现汽车的轻量化并保证冲撞安全性，高强度钢板的使用比例日益增加。用于制造高强度钢板的模具常采用冷作模具钢加 TD 处理和 CVD 处理等。即便如此，当冷冲模负载过大时，也会因镀层剥离等问题达不到所需寿命。面对高强度钢板使用量的不断增加，此问题也成为引人注目的课题。

对于要求尺寸精度达到微米级的精密模具来说，尺寸稳定性十分重要。即要求热处理尺寸变化较小，且不会随时间变化产生时效尺寸变化。

表 4-12　冷作模具钢的选用方法

应用		一般用途		耐磨		耐冲击	
		推荐	硬度 HRC	推荐	硬度 HRC	推荐	硬度 HRC
冷冲	冲裁	SKS93 火焰淬火钢 预硬 G040F	58～62 55～60 40	SKD11，DC53， SKH51	58～62	DC53 基体高速钢	58～61 58～60
	成形	SKS93，GOA，DC53	58～62	SKD11，DC53	58～62	DC53 SKH51	58～61 60～63
	冲头	GOA，SKD11	58～62	SKH51	58～62	DC53 基体高速钢	58～61 60～63
冷锻	模具	SKD11，DC53	58～61	SKD11 +表面硬化	58～62	SKH51，DC53 基体高速钢	58～62
	冲头	DC53，SKH51	60～63	SKH55，SKH57	60～65	DC53 基体高速钢	60～63
	镦锻模	SKH51	56～60	M41，SKH57	60～65	基体高速钢	60～63
	精整模	SKH51	58～62	VH54	58～62	DC53 基体高速钢	60～63
	螺母成形冲头	SKH51 基体高速钢	58～62	VH54	58～62	DC53 基体高速钢	58～62
	硬币模	GOA	58～62	SKD11，DC53	58～62	DC53	62～63

（续）

应用		一般用途		耐磨		耐冲击	
		推荐	硬度 HRC	推荐	硬度 HRC	推荐	硬度 HRC
冷锻	十字冲头	SKH51	60～64	MH64	62～65	SKH51 基体高速钢	58～63
	搓丝模	SKD11，DC53	60～62	DC53 SKH51	60～63 60～65	DC53 基体高速钢	60～63
	模架	SKD61	40～45			DC53	60～63
成形辊	成形辊	SKD11，DC53	58～62	DC3，DC53，SKH51	60～63	DC53	55～62
	森氏轧辊			DC3，DC53，DKH51 SKH40	60～65	DC53	58～62
	滚丝轮			DC3，DC53，SKH51	60～63	DC53 基体高速钢	58～62
	直辊			DC3，DC53	60～63	DC53	58～62
冲剪刀片	薄（≤6mm）	GOA，SKS93，SK95	58～62	SKD11，DC53	58～62	DC53	60～63
	中（6～8mm）		55～60		55～60	DC53 基体高速钢	58～61
	厚（≥8mm）	SKT4，GS2	38～45	SKD61，DC53， SKH51	45～60	DC53 基体高速钢	56～60

4.4 热作模具钢

4.4.1 损伤形式

热加工的目的是通过升高加工对象的温度来提高应变能，使其容易变形。即热加工是利用高温时呈现熔融状态或软化状态，以及低温时又表现为高强度或高硬度状态的金属晶体结构的变化，也就是利用相变特性进行加工的方法。这些用于热加工的模具材料称为热作模具材料或简称为热作模具钢。

热加工可大致分为压铸、热锻及热挤压，其相应损伤形式如图4-16所示。压铸时，由于模具表面与铝或镁等金属液反复接触，即经过反复受热和冷却而产生热龟裂，而且还会以此为起点造成开裂。作为压铸对象的金属熔液发生的熔蚀是压铸模所特有的损伤形式。

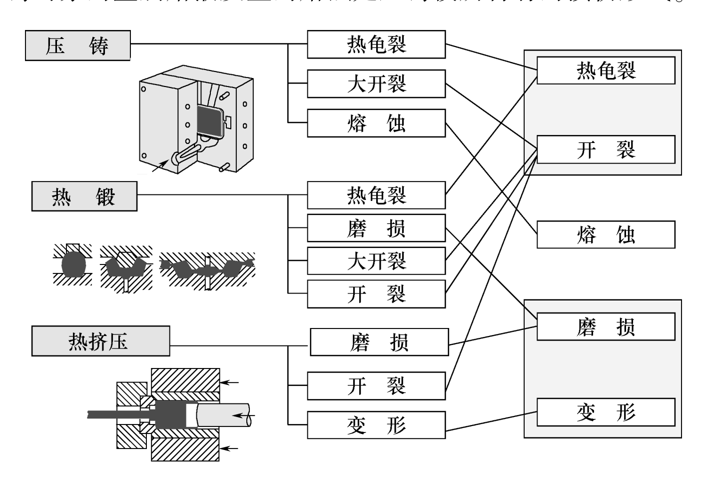


图 4-16 热作模具的损伤形式

热锻模在使用时，加工对象的加热温度高达1200℃左右，因此除了热龟裂之外，高温磨损也比较严重。另外，多用于铝制品成形的热挤压模，其主要损伤形式是由于与成形坯料接触而产生的滑动磨损和变形。

1. 热龟裂（Heat Checking）

热龟裂是热作模具表面经反复加热和冷却所导致的热疲劳现象之一，是产生于热作模具表面的龟甲状裂纹，如图 4-17 所示。热龟裂的形成机理如图 4-18 所示。当金属熔液接触模具时，模具表面部分受热膨胀，同时因来自模具内部的束缚而形成压缩应力。当该压缩应力超过高温屈服强度时便发生塑性变形，变形部分冷却后则产生拉伸应力。这仅是一个循环周期，经过反复加热、冷却，便会产生疲劳现象，最终导致龟裂发生。一个循环周期当中的作用力可以表示为

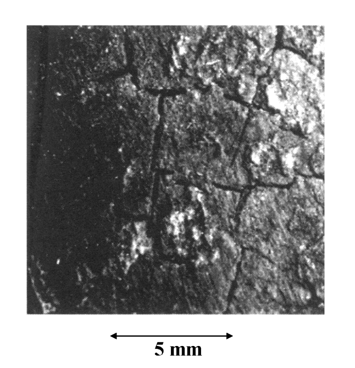


图 4-17　热龟裂实例

$$\sigma = \frac{E\,\alpha\,\Delta T}{(1-\mu)}$$

式中　σ——作用力；

E——弹性模量；

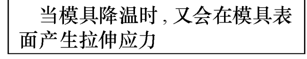
α——热膨胀系数；

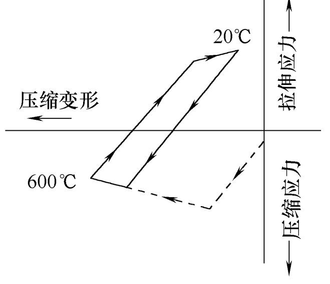
ΔT——温度梯度；

μ——泊松比。

压铸过程中，当模具表面接触熔融铝合金时，会受热膨胀

同时，由于来自模具内部的束缚，在表面形成压缩应力。如果该应力超过屈服强度，则产生塑性压缩变形





模具表面在20℃和600℃之间，反复受热和冷却时的应力应变循环变化曲线

图 4-18　热龟裂的形成机理（概念图）

由于热作模具钢的弹性模量及热膨胀系数几乎相同，因此应通过缩小温度梯度或提高热强度（屈服应力）使其不易产生屈服来减小塑性变形。

此外，由于材料的显微偏析（组织不均匀）助长了初期裂纹的发展，所以无偏析的均质材料较为理想。有关热作模具钢的热龟裂性还有一些共同研究结果，也欢迎参考[19]。

2. 开裂（Crack）

引起开裂的原因有多种，比如由热龟裂为起点扩展所致，在冲击载荷作用下因应力集中引起的开裂，由交变应力造成的疲劳等。如裂纹持续扩展，最终会导致以此为起点的断裂，造成模具失效，因此一般都尽快实施模具修补。

3. 高温磨损（Elevated Temperature Wear）

用于热锻压和热成形等锻模的表面温度有时会因加工对象的温度高达1200℃，且加工时会产生变形热而超过模具钢的相变点（约800℃）。高温磨损的形成机理如图4-19所示。模具表面的反复受热和冷却引起热龟裂；同时最表层在相变温度附近受热软化会出现塑性流动，该塑性流动一旦受阻则会被摩擦力带走，或者与热龟裂相连造成局部剥离，此类磨损和剥离即为高温磨损的一般形式[20]。另外，当最表层温度超过相变点时，会在冷却时产生二次淬火层。

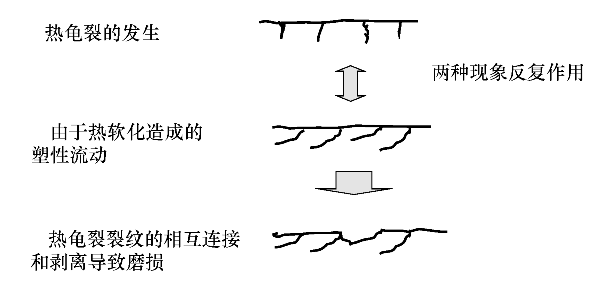


图4-19　高温磨损的形成机理

4. 熔蚀

熔蚀是指铝在压铸时，模具表面与铝液接触，形成铁和铝的合金并从表面剥离、脱落而造成的损伤现象，如图4-20所示。

避免模具与铝直接接触是最为有效的解决方法，例如在表面堆焊不易形成合金的金属层，或增加耐熔蚀性镀层等。

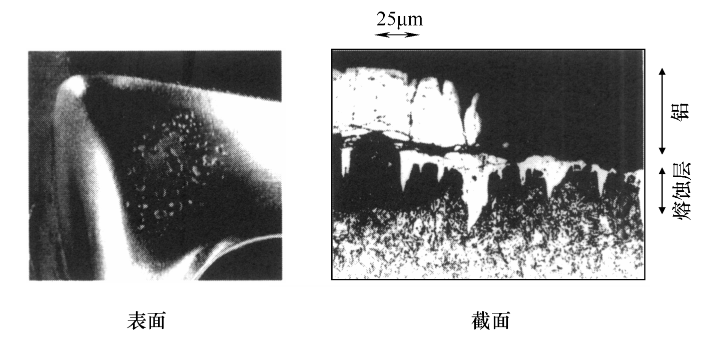


图 4-20　熔融铝对压铸模的熔蚀

4.4.2　热作模具钢的化学成分与性能定位

具有代表性的 JIS 标准钢和改良的热作模具钢及其热处理条件和性能分别见表 4-13、表 4-14。热作模具钢的牌号对照表见表4-13[21]。各钢种的性能定位如图 4-21 所示。此外，SKT4 钢和 SKD61 钢的显微组织如图 4-22 所示，作为参考。与冷作模具钢相比，热作模具钢的含碳量较低，因此几乎没有粗大碳化物，且碳化物自身的含量也较少。

热加工用模具钢主要分为三种，按韧性高低顺序排列有热锻模用钢、热作模具钢、高速工具钢。其中，高速工具钢的高温强度最高。

包括热锻模用钢在内的热作模具钢的发展历史如图 4-23 所示。热锻模用钢被日本金属标准 JES（JIS 之前的旧标准）命名为 SKT，后来几经修改，在 2000 年修订时只有 SKT3、SKT4、SKT6 三个钢种保留下来。热作模具钢与高速工具钢同样曾经是以 W 系为主流，但因淬透性有限且韧性又低，导致美国标准钢的 5% Cr 系热作模具用钢 H11、H12、H13 的应用逐渐增多，最终，作为 SKD6、SKD61、SKD62 被依次列入 JIS 标准。随着汽车产业的发展，这些 JIS 钢也逐渐得到确立，到了 1970 年以后，各厂家的新品牌钢 也纷纷登场。热

表 4-13　主要热作模具钢

分类	钢种		化学成分（质量分数,%）								AISI	用途
	JIS	大同	C	Si	Mn	Cr	Mo	W	V	Co		
热锻钢	SKT4	GFA	0.55	0.2	1	1.1	0.5	1.6Ni	0.1	—		锤锻模
	—	GF78	3Cr-Mo-V									
热作模具钢	—	DH76	3Cr-Mo-V（析出硬化钢）							—		热锻模
	(SKD6)	DHA	0.39	1.1	0.4	5.0	1.2	—	0.6	—	H11	热冲模 压铸模 热挤压模
		DHA-W	0.38			5.0	1.2	—	0.6			
	SKD61	DHA1	0.38	1.0	0.3	5.3	1.3	—	1.0	—	H13	
	—	DHA2	SKD61 改良钢									
	SKD62	DH62	0.38	1.0	0.3	5.3	1.3	1.3	0.4	—	H12	
	—	DH21	0.39	0.3	0.6	5.0	2.0	—	1.0			
	—	DH31-EX	5.5Cr-2.5Mo									
	—	DH31-S	5.5Cr-3Mo									
	—	DH71	0.40	0.3	1.0	3.0	2.0	—	1.0	—		高速热锻模 精锻模
	SKD7	DH72	0.33	0.3	0.4	3.0	3.0	—	0.5	—	H10	
	—	DH73	0.30	0.4	0.5	3.0	3.0	—	0.5	3.0		
	—	DH32	2Cr-3Mo									
	SKD8	DH41	0.40	0.3	0.4	4.4	0.4	4.2	2.0	4.2	H19	热冲模
高速工具钢	—	DRM1	0.6	—	—	4.2	$2w(Mo)+w(W)=5\%$		1.5	—		热锻模
	—	DRM2	0.7	—	—	5.5	$2w(Mo)+w(W)=6\%$		1.0	—		温锻模

表 4-14　主要热作模具钢的热处理条件和性能

钢种		热处理温度/℃			硬度	
JIS	大同	退火	淬火	回火	退火 HB	淬火回火 HRC
SKT4	GFA	760～810 缓冷	850～900 油冷	600～650 空冷	≤241	—
—	GF78	预硬钢			37～45HRC	
—	DH76	析出硬化钢			—	≤45
—	DHA	820～870 缓冷	1000～1050 空冷,油冷	550～650 空冷	≤223	≤53
—	DHA-W	820～870 缓冷	1000～1050 空冷,油冷	550～650 空冷	≤223	≤53
SKD61	DHA1	820～870 缓冷	1000～1050 空冷,油冷	550～650 空冷	≤229	≤53
—	DHA2	820～870 缓冷	1000～1050 空冷,油冷	550～650 空冷	≤235	≤53
—	DH62	820～870 缓冷	1000～1050 空冷,油冷	550～650 空冷	≤229	≤53
—	DH21	820～870 缓冷	1000～1050 空冷,油冷	550～650 空冷	≤229	≤53
—	DH31-EX	820～870 缓冷	1000～1050 空冷,油冷	550～650 空冷	≤229	≤53
—	DH31-S	820～870 缓冷	1000～1050 空冷,油冷	550～650 空冷	≤235	≤53
—	DH71	820～870 缓冷	1020～1050 油冷,盐浴	550～650 空冷	≤229	≤53
SKD7	DH72	820～870 缓冷	1000～1050 油冷,空冷	550～650 空冷	≤229	≤53
—	DH73	820～870 缓冷	1000～1050 油冷,空冷	550～650 空冷	≤235	≤52
—	DH32	820～870 缓冷	1000～1050 油冷	550～650 空冷	≤229	≤54
SKD8	DH41	820～870 缓冷	1070～1170 油冷,空冷	600～700 空冷	≤241	≤55
—	DRM1	800～880 缓冷	1100～1140 油冷,盐浴	550～620 空冷	≤235	56～58
—	DRM2	800～880 缓冷	1050～1100 油冷,盐浴	550～620 空冷	≤235	58～62

注：空冷的钢种可采用真空淬火。

锻模用改良钢有 3% Cr-3% Mo 钢和基体高速工具钢，压铸模用钢有低 Si-5% Cr-2% ～3% Mo 钢等。

热作模具钢用于锤锻模、锻压模、温锻模、压铸模、热挤压模等。其用途与冷作模具钢不同，性能要求也相异。下文将按用途分别介绍热作模具钢的特点。

表 4-15　热作模具钢牌号对照表

分类	JIS	AISI	爱知	山阳	住友	大同	高周波	日立	不二越	三菱	Uddeholm	Boehler
合金工具钢	SKD4					DH4	KD4					
	SKD5	H21				DH5	KD5					
	SKD6	H11				DH6	KD6				VIDAR	W300，W400
	SKD61	H13	SKD61	QD61		DHA DHA1	KDA	DAC			ORVAR-2M	W302
	SKD61-M		AUD61 AUD60A	QDA61 QDN	SDH3 SDH4 SDH52 DK65	DHA2 DH21 DHA-WORLD	KDA1 KDA1S	DAC3 DAC10			ORVAR-S	
					SDH43	DH31-S DH31-EX	KDAMAX	DAC55 DAC-MAGIC			DIEVAR	W303，W403
	SKD62	H12	SKD62	QD62		DH62	KDB					
	SKD7	H10				DH72	KDH1					W320
	SKD7-M		AUD72	QDH		DH32 DH71 DH73		DAC40 YEM-K	DURO-M1			

（续）

分类	JIS	AISI	爱知	山阳	住友	大同	高周波	日立	不二越	三菱	Uddeholm	Boehler
合金工具钢	SKD8	H19	SKD8			DH41	KDF					
	SKD8-M					DH42	KDF4	MDC-K DAC45				
	SKT4		SKT4A	QT41		GFA	KTV	DM			ARVAR14	W500
	SKT4-M		AUD60	QDT	SDH21 SDH23	GF78		YHD28				
	预硬		AUD91 MPH-K			DH76				HD22B		
	其他					DH2F	KAP90F	FDAC				
				QF5	SDH122	DHA-Thermo						
高速工具钢	基体型			QHZ		DRM1 DRM2	KMX1	YXR33	DURO-F1		UNIMAX HOTVAR	W321 W360 W705

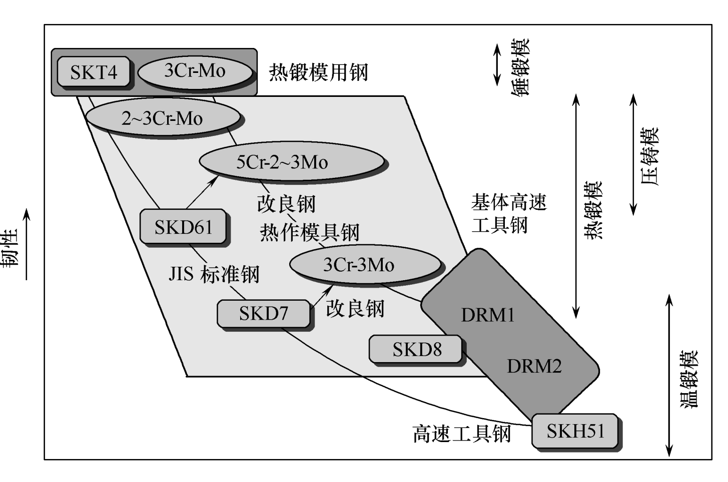
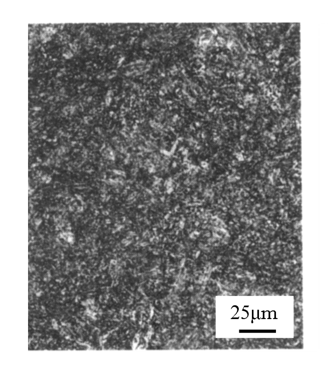
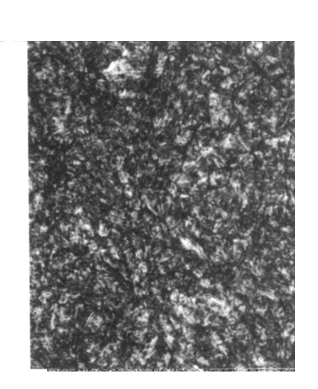


图 4-21　热作模具钢的性能定位（概念图）





热锻模用钢　SKT4

淬火 ：860 ℃，油冷

回火 ：550 ℃

硬度 ：46.4 HRC

热作模具钢　SKD61

淬火 ：1025 ℃，油冷

回火 ：565 ℃

硬度 ：51.4 HRC

图 4-22　SKT4 钢和 SKD61 钢的显微组织

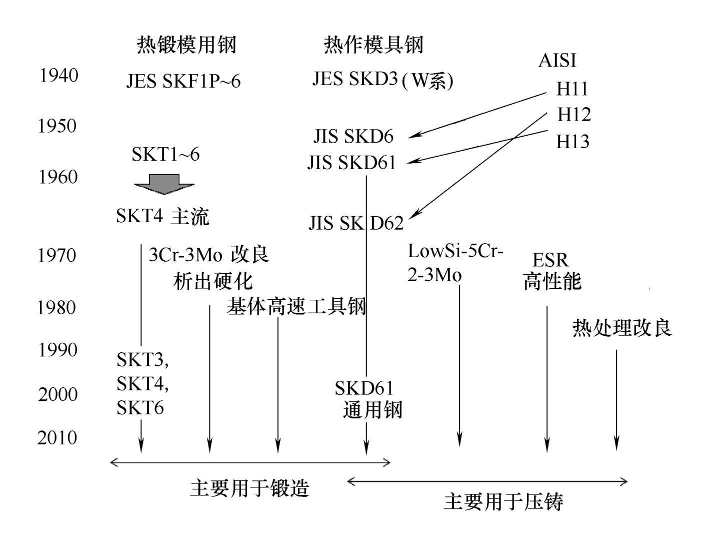


图 4-23　热作模具钢的发展历史

4. 4. 3　锻造模具用钢

不管是自由锻还是模锻，本节均以锻压机中的这些模具为研究对象来展开话题。除了模具以外，锻压机的活塞杆使用铬钼钢和镍铬钼钢等机械结构钢，压头和模座等使用 SKT4 钢等。

热锻模的损伤形式和性能要求如图 4-24 所示。锻模要求具有高温耐磨性、耐热龟裂性及耐开裂性。锻造原来以自由锻为主流，致使冲击负荷较大，因此要求材料韧性好，一般使用 SKT4 钢。该钢种是组成为 0. 55% C-0. 8% Mn-1. 65% Ni -1% Cr -0. 45% Mo-0. 1% V 的 Ni- Cr- Mo钢，淬透性和韧性俱佳。

后来，从降低噪声、保护环境的角度出发，自由锻逐渐向模锻转化。伴随着这一转变，抗软化性及高温强度材料的需求量增加，热作模具钢也逐渐得到了采用。其中 0. 2% C-3% Cr-1% Mo 系钢（如大同品牌 GF78）被用于大型曲轴锻模等。

为进一步增强高温耐磨性，3% Cr-3% Mo 系热作模具钢得到了应用。JIS 标准中的 SKD7（0. 33% C-3% Cr-2. 75% Mo-0. 55% V）钢是

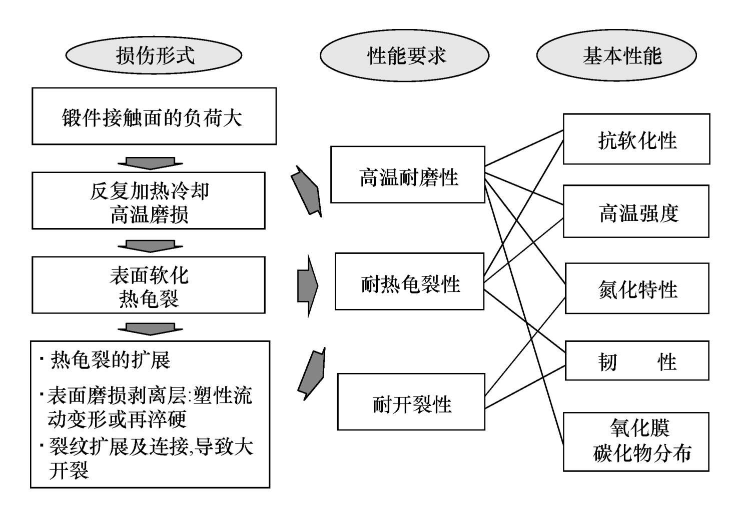


图 4-24　热锻模的损伤形式和性能要求

具有代表性的钢种，各厂家还分别研制了其改良钢种。此外，还有高温强度更高的 SKD8（0.40% C-4.4% Cr-0.4% Mo -4.2% W-1.9% V-4.3% Co）钢种。典型钢种的回火硬度曲线和高温硬度如图 4-25 和图 4-26 所示。SKD7 系钢（大同 DH71）在温度高于600℃时，其回火硬度和高温硬度较高，体现了出色的高温耐磨性。但这些钢的淬透性差，尺寸较大时心部淬不透，回火后韧性也较低，所以不适用于大型锻模。

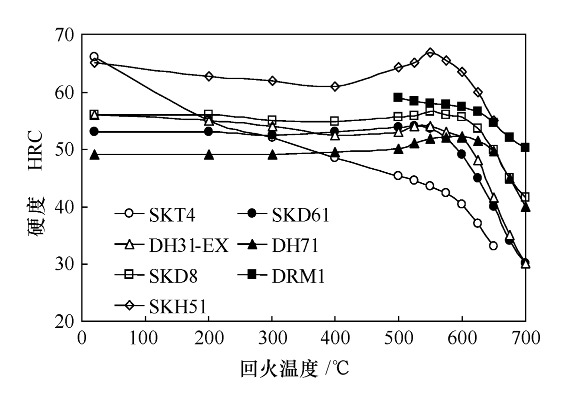


图 4-25　典型钢种的回火硬度曲线

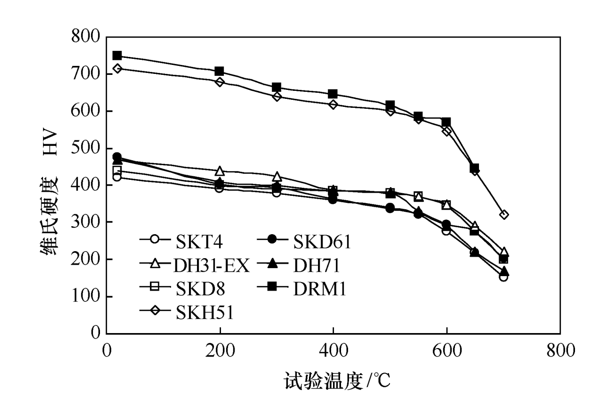


图 4-26　典型钢种的高温硬度曲线

锻模有时也采用析出硬化型模具钢。这是在材料生产厂预先热处理到约 40HRC 后提供给用户的钢种。该钢种经刻模加工后可直接交付使用。其后在使用中随模具表面温度上升产生析出硬化效果，使硬度达到 45～48HRC，有助于提高耐磨性。因此，其适用于因加工对象材料塑性流动剧烈，易导致模具表面温度上升的深型腔模具。表4-13 中的析出硬化钢即相当于该类钢。

随着锻造部件的无切屑化及近净成形技术（NNS）的进展，企业开始注重利用闭式模温锻及强化水冷等方法来提高精度。虽然温锻较适用于制造汽车的轴承件及等速万向节的外座圈等部件，但由于温度仅达 800℃，以至加工对象材料的变形阻力较大，故要求模具具有高温强度和耐磨性。具有此性能的一直是中碳并具有高韧性和出色高温强度的基体高速工具钢。最近，有厂家开发出将粗大一次碳化物含量降至极低的新型基体高速工具钢［大同 DRM1：0.6%C-4.2%Cr-5%（2Mo＋W）-1.5%V］，可望在多种用途上进一步延长寿命[15]。

该高速工具钢是以消除通常基体高速工具钢中残留的粗大一次碳化物为目标，经改善化学成分、施以重熔精炼（ESR）及调整最佳制造条件，来设法抑制粗大碳化物生成的新钢种。

4.4.4 压铸模具用钢

1. JIS 通用钢与损伤形式

如图 4-23 所示，SKD6 钢和 SKD61 钢于 1956 年被规定为 JIS 标准钢以来，在压铸模方面一直得到了广泛使用。两钢种在具有相同的基本成分（0.38% C-1% Si-5.2% Cr -1.25% Mo）的基础上，V 的质量分数 SKD6 钢为 0.4%，SKD61 钢为 1%。它们的淬透性和韧性俱佳，而且在接触铝液（600 ~ 700℃）引起的模具表面温度上升（至 500℃左右）的情况下也具有优良的高温强度和抗软化能力。在美国，目前 AISI H13 仍是使用范围最为广泛的钢种。

图 4-27 所示为压铸模损伤的主要形式[22]。其中最主要的是热龟裂，约占全体的 78%，其他主要为熔蚀和大开裂。因此，压铸模具用钢的开发也是着重于提高耐热龟裂性和韧性，进行不断改良。

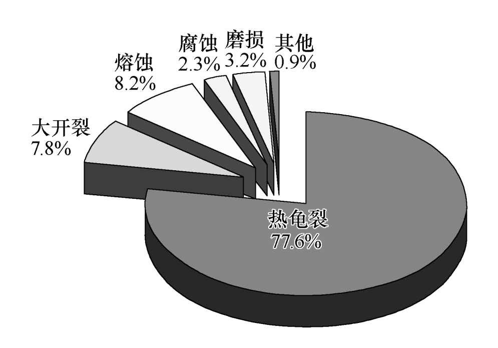


图 4-27　压铸模损伤的主要形式

2. 改良钢（低 Si-5% Cr-2% ~3% Mo 钢）**及其发展过程**

进入 20 世纪 80 年代，为解决全球性环境问题，人们更加追求低油耗和轻量化，铝合金材料的汽车零部件等得到了大力推广。由此对压铸模的寿命等性能要求更高，为此各种改良钢相继问世，开发目标是通过增强耐热龟裂性来提高产品精度，与此同时也要提高韧性以防早期开裂。其中，代表性钢种有 0.38% C-低 Si（≤0.3%）-5% Cr-高 Mo 系钢，Mo 的质量分数为 2% ~3%（大同 DH21、DH31-S[23]），

改善了高温强度和抗软化能力，可望提高耐热龟裂性。

当 SKD61 钢的淬火加回火硬度为 47HRC 时，合金元素对其热龟裂性的影响如图 4-28[24] 所示。这是将尺寸为 ϕ15mm × 5mm 的圆板状小试样，高频加热至 700℃ 后水冷，并如此反复进行 1000 次后，在 1/2 厚度的断面上测量所有裂纹的深度和条数，然后计算出平均裂纹深度而得出的结果。由此可观察到，Si 和 Mn 的含量越低及 Mo 的含量越高，其平均裂纹深度越浅，即耐热龟裂性越好。

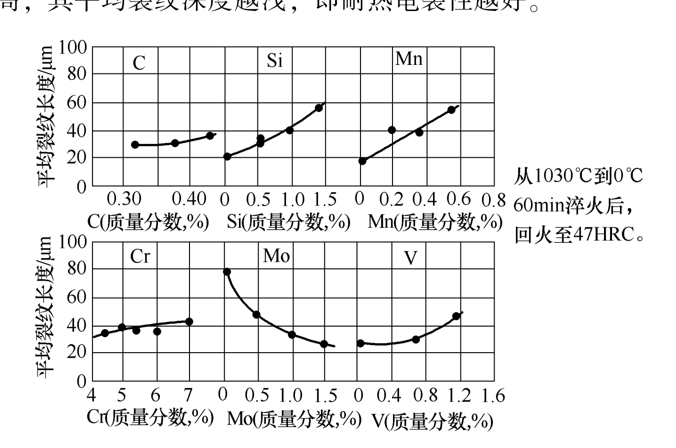


图 4-28　合金元素对 SKD61 钢热龟裂性的影响

此外，减少含硅量有助于提高冲击韧度。这是因为熔炼—凝固时生成的粗大碳化物含量随含硅量的降低而减少，其结果促进了碳化物的微细化和组织均匀化，从而使韧性和热龟裂性得到改善[24]。

另外还判明，增加含钼量可提高贝氏体淬透性及改善高温强度和蠕变强度，适用于要求寿命长及承受高负荷的大型压铸模。低 Si-5% Cr-3% Mo 钢（大同 DH31-S）与 SKD61 钢的耐热龟裂性比较如图 4-29[23] 所示。随着硬度的上升，平均裂纹长度有所缩短，在相同硬度下，DH31-S 钢比 SKD61 钢的热龟裂性好得多。

最近，为提高大型模具的心部韧性，对淬透性加以改善的 H11 系钢 DHA-WORLD[25]、5% Cr-高 Mo 钢 DH31-EX 钢[26] 等（大同品牌）相继得到了开发，进一步扩大了使用范围。

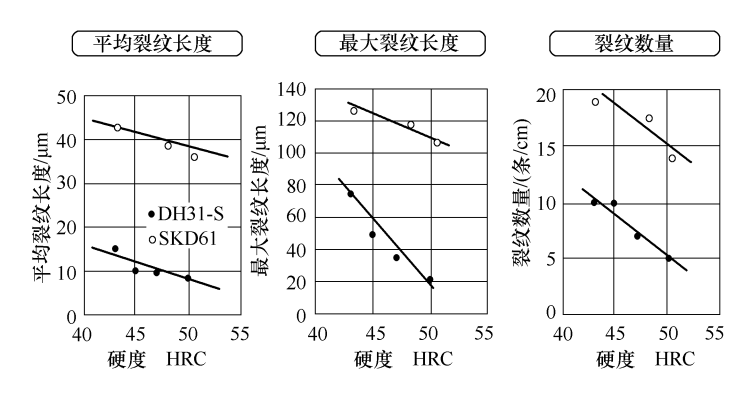


图 4-29 热作模具钢的耐热龟裂性比较

3. 韧性的改善

压铸模损伤形式中约 78% 是热龟裂，约 8% 是大开裂。压铸模出现热龟裂时可通过修补继续使用，而有时发生大开裂会导致模具失效，所以韧性的改善是至关重要的课题。

改善韧性有两种方法。其中一种是重熔精炼，尤其是利用 ESR（Electro Slag Remelting）重熔精炼可大幅度提高纯净度，细化显微组织，从而提高冲击韧度并降低其偏差。所谓 ESR 重熔精炼，是将经一次熔炼后凝固的钢锭，在水冷结晶器中靠电渣电阻热再次将其逐渐熔化精炼，并急冷凝固的方法，因此也称为电渣重熔精炼。它可以使材料在整个长度和断面上获得纯净无偏析组织。将 SKD61 钢与其 ESR 钢材（大同 DHA1-ES）热处理至硬度为 43～46HRC 后，从材料强度最低的厚度方向取样，进行冲击试验，结果如图 4-30 所示。为评价数据的分散性而采用韦伯分布表示。观察其特点可发现，ESR 钢材的平均冲击韧度提高了 1.5 倍，并且其数据的分散性显著降低[27]。

另一种方法是淬火。模具冷却时，在从奥氏体化温度下降到 900℃ 的过程中，如果晶界上析出碳化物，则会降低韧性。当 500℃ 以下的冷却速度较缓慢时，会发生贝氏体转变，此组织经高温回火后其韧性比回火马氏体有大幅度下降。这是因为发生贝氏体转变的组织比马氏体粗大，板条宽度（针状贝氏体组织的宽度）变大，使冲击裂纹容易扩

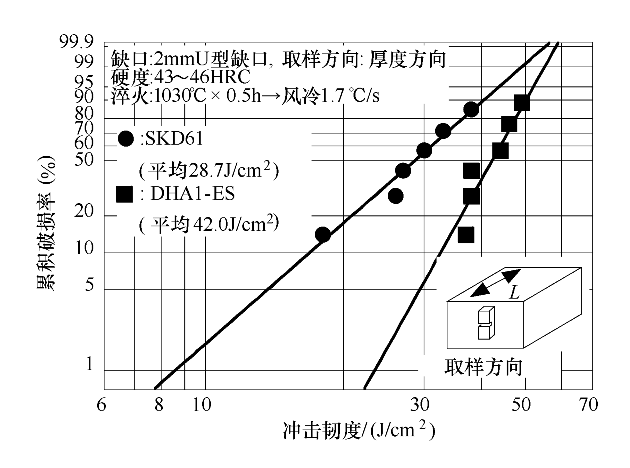


图 4-30　冲击韧度的韦伯分布（SKD61 和 DHA1-ES）

展。也有用半冷却时间等概念研究此类淬火速度影响的论著[28]。

为解决此类问题，以油淬→取出冷却为基本方式的 HIT（High Impact Value Treatment）热处理法[29]等得到了应用，并与前述 DH31 系长寿命钢相配合，有效地防止了开裂。此外，通过对上部和下部温度区间冷却速度影响的研究得知，下部温度区间冷却速度的影响大于上部温度区间冷却速度的影响[30]，其有关内容如图 4-31 所示。鉴于 550℃以上的冷却速度影响较小，所以先急冷至 550℃，然后对其下部温度区间的冷却速度进行改变，显现出较大影响。由此得知下部温度区间冷却速度的影响几乎占整体的 70% ~80%。基于这些研究结果，目前针对压铸模的各种淬火方法纷纷得到了开发应用。

4. 压铸模具用钢的发展趋势

目前压铸模材料的变化较大，压铸行业的发展方向及对模具材料的要求如图 4-32 所示。为进一步促进汽车向轻量化发展，钢制部件也改为用高强度铝合金（高 Si 系），并采用挤压压铸方法，即在铸造的同时再施以机械压力的压铸。此外，薄壁件的成形也采用真空压铸。各种组合件的一体化趋势造成产品复杂化、大型化，因而对材料的淬透性也就有更高要求。另外，为提高成形效率，有通过强化模

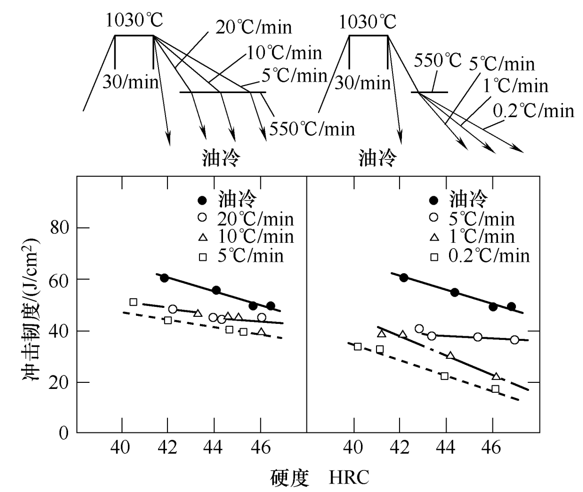


图 4-31 淬火冷却速度对 SKD61 钢冲击韧度的影响

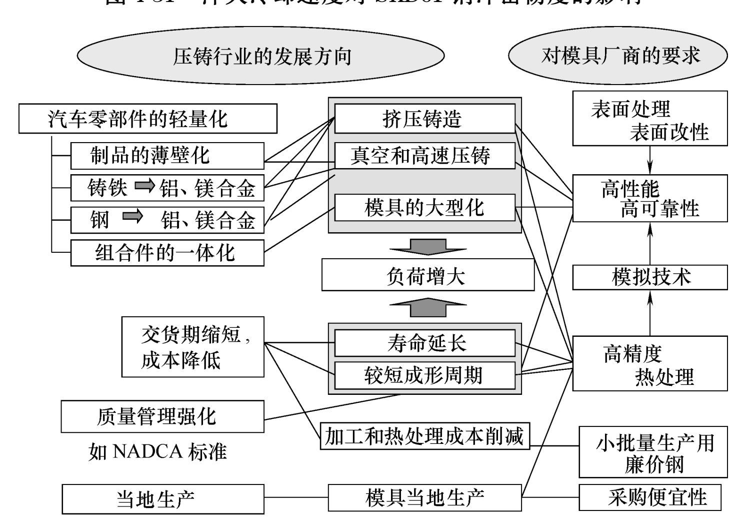


图 4-32 压铸行业的发展方向及对模具材料的要求

具内部冷却而力求缩短成形周期的趋势。因此冷却水孔增多，且与模具表面的距离缩小，这就需要韧性更高的材料。因此，高性能和高可靠性的模具材料越发显得重要。如前所述，DHA-WORLD、DH31-EX等即为通过提高淬透性来改善大型模具心部韧性的钢种，已作为北美

压铸协会（NADCA，Noreth American Die Cast Associaton）标准的推荐钢种得到登记[31]。

再有，质量管理方面也逐渐严格起来。例如，在 NADCA 标准中，除了设有高性能钢检验标准外，还对真空淬火及焊接修补操作作了规定[31]。

为满足这些需求，制造出高性能和高可靠性的模具，除了对模具材料有要求之外还需要可达到高韧性低变形的高精度热处理，也要考虑采用表面处理和镀层等技术。

对压铸模来说，较为常用的热处理方法有：增加表面硬度和强度，施加压缩应力来提高耐热龟裂性，进行氮化处理来强化耐熔蚀性和耐咬伤性等。从最近的研究来看，氮化层较厚会加大裂纹扩展深度，建议轻度渗氮。

此外，为防止熔蚀及黏附，除了各种氮化处理外，还出现了复合镀层方法。比如利用等离子 CVD（化学气相沉积）形成多层镀膜，特殊氮化 + PVD（物理气相沉积）形成耐熔蚀性优良的 CrN 镀层等，已逐步应用在压铸模部件（镶针、镶块）等方面[32,33]。

模拟技术也是延长寿命的关键技术。以往常需经过分析废模和制订解决方案及试制的过程，而利用模拟技术可以缩短上述流程时间。此外，模拟技术也用于模具损伤解析、损伤预测及热处理变形预测等领域。这些技术对降低成本和缩短交货周期起到了很大作用。

另外，随着汽车及家电厂家的生产基地向国外转移，其模具材料采购，尤其是热处理的管理等也成为有待解决的问题。

5. 用于压铸机的其他材料

对压铸模起固定作用的模板，一般采用球墨铸铁及中碳钢铸件等制作，有时也会选用碳素钢及铬钼钢等。

成孔销及推杆等一般采用通用热作模具钢 SKD61 制作。成孔销接触铝液易发生熔蚀和咬伤，这种情况下通过渗氮处理及镀层处理来避免与铝液直接接触，以达到防止熔蚀的目的。

对于热室压铸机，模具中的鹅颈管由于长时间处于金属熔液之中，所以需要具有较强的抗软化性和耐熔蚀性。此类产品所使用的材料是组成为 0.2% C-10% Cr-2% Mo -5.5% W-10% Co 的高 Cr-W-Mo 钢。

4.4.5 热挤压模具用钢

1. 热挤压模具系统和性能要求

图 4-33 所示为热挤压模具系统，主要由挤压筒、衬套、挤压杆和模具构成。一般根据挤压件的材料来选用挤压模具系统的材料。挤压件材料当中用得最多的是铝合金，其锭坯被加热到约 500℃后经模具挤压成形。而铜合金锭坯则要加热到 800℃左右的较高温度，即模具钢的 A_1 相变点温度附近或更高。铁合金则要加热到 1200℃左右。

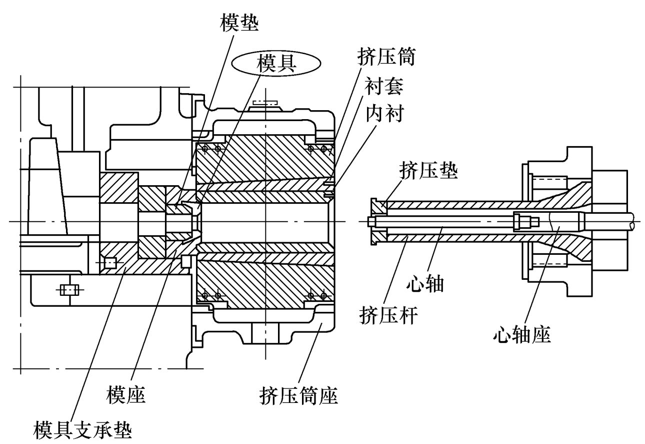


图 4-33　热挤压模具系统

一般情况下采用 SKD61 钢及 SKD62 钢作为模具系统材料，但与锭坯接触的模具、心轴、挤压垫、内衬等磨损严重的模具部件，则使用 SKD61 改良钢及高温强度和耐磨损性均较好的 SKD7 钢等。像模垫、心轴座、挤压筒等不与锭坯直接接触的辅助部件则使用 SKT4 钢。

这些铝挤压工具的关键所在是模具。以热挤压模具为例，对其损伤形式和性能要求进行分析的结果，如图 4-34 所示。由于挤出对象是加压状态的高温锭坯，所以模具的成形面会发生磨损。还有，其反复的弯曲变形在加速磨损的同时，也会因疲劳产生开裂及破损。不过，与熔融状态的压铸相比，挤压用锭坯的温度较低，故热龟裂比较轻微。另外，为防止磨损和黏附可进行氮化处理（一般为气体氮化及盐浴软氮化），通常在挤压一定量的锭坯后，在磨损尚处于轻微状

态时予以修补，并再次进行氮化处理后继续使用。因此对同一模具，570℃下保温约 5h 的氮化，通常要反复进行 10～20 次，结果导致模具内部的硬度会逐渐下降，造成强度下降。为此，要求材料具有优异的抗高温软化性，以便能够承受反复氮化。

以往铝挤压件主要用作建筑材料，不过现在随着轿车、货车及车厢的轻量化进展，采用高强度铝合金制作大型部件有增加趋势。因此要求模具材料的淬透性要好，并具有更高的抗高温软化性和高温强度。

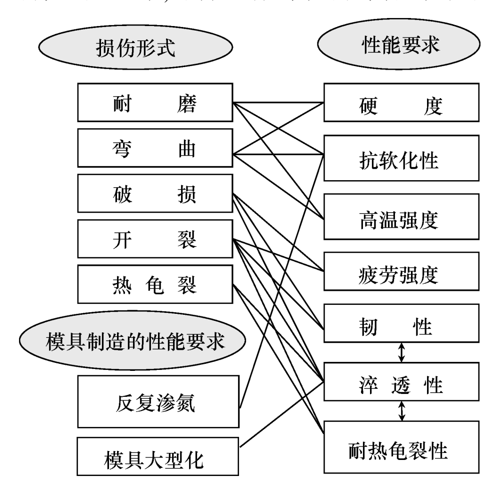


图 4-34　热挤压模损伤形式及性能要求

2. 铝挤压模具用钢

铝挤压模具一般采用 5% Cr-1% Mo 系的 SKD61 及 SKD62 钢制作。与此相比，抗高温软化性更为优异的钢还有 3% Cr-3% Mo 系的 SKD7 等。如图 4-25 所示的回火硬度曲线，在超过二次硬化的 500～550℃温度区域，其抗软化性能是含铬量越低及含钼量越高越好。这是因为含铬量低可以抑制铬系碳化物（M_7C_3 型）的成长，以及回火时钼系微细碳化物（Mo_2C）的增多。图 4-35 所示为类似钢种 3% Cr-2% Mo 系的 DH71 钢与其他钢种的抗高温软化曲线。由此可见，与 5% Cr-3% Mo 系相比，即使在 600℃长时间保温也不易软化。

这样一来，即使反复进行渗氮，模具心部硬度也不容易下降，与

SKD61 钢相比其强度下降得到抑制。还有，含钼量高可使其具有较优异的高温强度和蠕变性能，从而有助于延长使用寿命。

为了满足近些年来模具大型化的需求，针对在保持淬透性的同时提高抗软化能力及高温强度而开发的如 DHA2（0.4% C-Ni-5.5Cr-1.5% Mo-V）等钢种已发挥了作用。此外，可用于压铸模的低 Si-5% Cr-3% Mo 钢等也得到了应用。

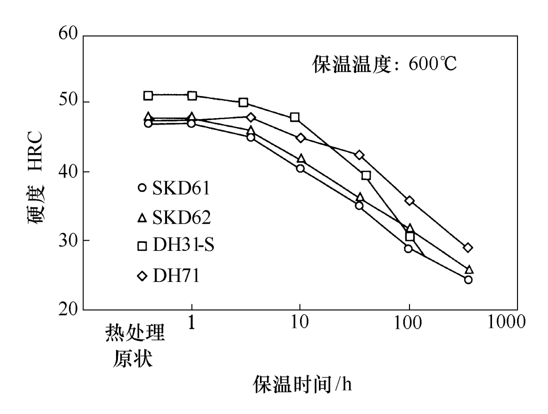


图 4-35　热挤压模具钢的抗高温软化曲线

3. 铜及铜合金的挤压模具用钢

铜合金的加热温度本来就较高，再加上加工变形热，对一般模具用钢来说会超过相变点进入奥氏体转变区域，所以需要采用 SUH660（≤0.08% C-26% Ni-15% Cr-1.25% Mo-2% Ti-V，Al）等耐热钢。由于它是奥氏体系耐热钢，初期硬度为 35～37HRC，常温强度虽然低于 SKD 系模具钢，但是高温下的强度下降幅度较小，可与 SKD 系模具钢形成互补，尤其适用于需要保持高温强度的场合。

此外，在要求寿命较长的铜挤压模具系统中，超耐热合金 Inconel718（53% Ni-3.1% Mo-0.9% Ti-0.4% Al-Nb-其余 Fe）也得到了应用。

4.4.6　热作模具钢的选用方法

表 4-16 为热作模具钢的选用方法。总之，对于一般用途，主要是选用 JIS 所规定的热作模具钢，对于大量生产或高负荷的场合，

表 4-16　热作模具钢的选用方法

<table>
<tr><th colspan="3" rowspan="2">用　　途</th><th colspan="2">一　　般</th><th colspan="2">高负荷、大量生产</th></tr>
<tr><th>牌　　号</th><th>HRC</th><th>牌　　号</th><th>HRC</th></tr>
<tr><td rowspan="5">热锻</td><td rowspan="3">冲压</td><td>小型</td><td>SKD61，SKD62</td><td>42～50</td><td>DH71，DH76，DH31-EX</td><td>42～50</td></tr>
<tr><td>中型</td><td>SKD61，SKD62</td><td>42～48</td><td>DH71，DH76，DH31-EX</td><td>42～48</td></tr>
<tr><td>大型</td><td>CF78，SKD62</td><td>38～46</td><td>SKD61，SKD62，DH31-EX</td><td>40～46</td></tr>
<tr><td colspan="2">精密锻造</td><td>DH72，SKD7，SKD8</td><td>43～50</td><td>SKH51，Martix HSS</td><td>56～66</td></tr>
<tr><td colspan="2">镦锻</td><td>SKD61，SKD62</td><td>44～50</td><td>DH71</td><td>44～50</td></tr>
<tr><td rowspan="7">压铸</td><td rowspan="5">模具</td><td rowspan="2">Zn</td><td>DH2F</td><td>37～43</td><td rowspan="2">SKD61，DH21，DH31-E</td><td>42～48</td></tr>
<tr><td>SKD61</td><td>42～48</td><td></td></tr>
<tr><td rowspan="2">Al，Mg</td><td>DH2F</td><td>37～43</td><td rowspan="2">DH21，DH31-EX</td><td>42～48</td></tr>
<tr><td>DHA，SKD61</td><td>42～43</td><td></td></tr>
<tr><td>Cu</td><td>SKD61，DH42</td><td></td><td>SKD8，DH31-EX</td><td>42～48</td></tr>
<tr><td colspan="2">顶杆</td><td>DH2F</td><td>37～43</td><td>MAS1C，DH31</td><td>50～53</td></tr>
<tr><td colspan="2">型芯镶针</td><td>SKD61</td><td>42～48</td><td>DH31-EX，SKH51，
Matrix HSS</td><td>55～62</td></tr>
<tr><td rowspan="2">热挤压</td><td colspan="2">挤压筒</td><td>SKT4，SKD61，DHA2</td><td>35～45</td><td>SKD61</td><td>43～48</td></tr>
<tr><td colspan="2">外套筒</td><td>SKT4，SKD61，DHA2</td><td>35～45</td><td></td><td></td></tr>
</table>

（续）

用途			一般		高负荷、大量生产	
			牌号	HRC	牌号	HRC
热挤压	内套筒	Cu	SKD8	43～48	SUH660	30～33
		Al	SKD61，DHA2	43～48	SKD62	43～48
		Fe	SKD61，DHA2	43～48	SKD62	43～48
热挤压	模座		SKD61，DHA2，DH62	40～48		
	模具		SKD61，DHA2，DH71	40～48	DH71，DH31-EX	43～48
	模垫		SKD61，DHA2	40～48		
	心轴	Cu	SKD62	43～48	DH71，SKD8	43～48
		Al	SKD61，DHA2，SKD62	43～48	DH71	43～48
		Fe	SKD61，DHA2，SKD62	43～48		
	心轴座		SKT4，SKD61，DHA2	37～45		
	挤压垫	Cu	SKD61，DHA2，SKD62	43～48		
		Al	SKD61，DHA2，SKD62	45～50	DH71	43～48
	模具支承垫	Cu	SKD61，DHA2，SKD62	43～48		
		Al	SKD61，DHA2，SKD62			

需要选用 JIS 的高品位钢种或是有品牌的改良钢。

4.5　塑料模具钢

4.5.1　塑料模具的发展背景

从第二次世界大战后恢复重建期开始，经过高度成长期，又伴随着汽车产业及家电产业的高速发展，塑料工业也得到了大幅度提升。拿家电产业来说，洗衣机、冰箱、吸尘器等市场自 1960 年起快速发展，到 1975 年几乎普及开来。其后，彩色电视机、收录机、立体音响、室内空调机等相继问世，传真机、电子打字机、个人计算机等陆续登上舞台，如今称为数码家电的手机、数码相机、DVD 等的普及率也不断升高，使得用于制造这些产品的塑料也急速增多。近 30 年的塑料生产量如图 4-36[34] 所示。由图 4-36 可知，1980 年的生产量为 700 万 t，到了 1995 年增加了一倍。将塑料的密度换算成体积的话，已超过了铁及钢产品的体积。

不过，生产量也随整个经济发展的变化而有波动，比如 1990 年泡沫经济崩溃时出现萎缩，伴随着 IT 革命的兴起而增长，2008 年受到全球金融危机的影响又下降等。加之遭遇东日本大地震及各种产品的国外生产增加等原因，经济低迷至今仍在持续。

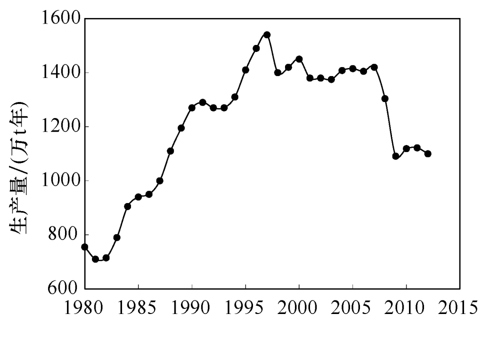


图 4-36　塑料生产量

那么，对于塑料模具的需求，塑料模具钢的发展方向又是怎样的呢？说到底，最终目标是以低成本制造出满足使用要求的高质量产品。围绕此目标，塑料模具钢的发展方向如图 4-37 所示。其中，人们对降低材料成本和缩短交期最为关注，因此在较短交期内提供可减少切削余量的高精轧钢的生产系统得到了确立。

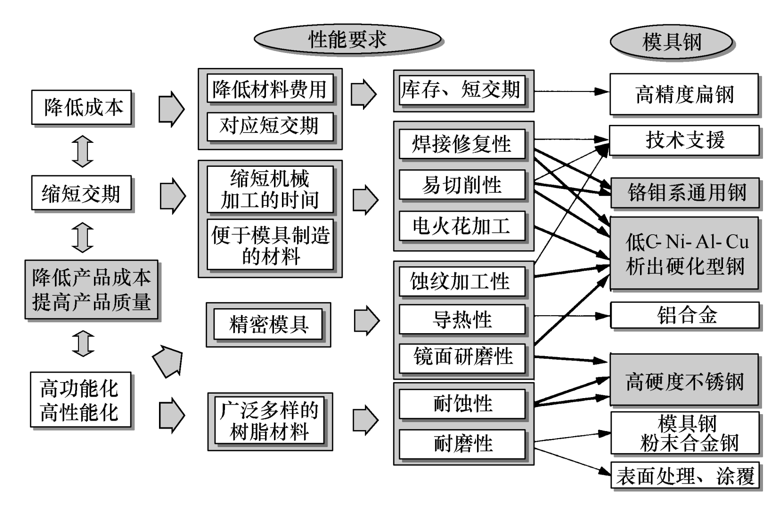


图 4-37　塑料模具钢的发展方向

此外，对塑料模具来说，模具加工成本大于材料成本，因此要求塑料模具既容易加工制作又耐用。制作模具时，塑料模具钢要求具有切削性、研磨性、镜面抛光性、蚀纹加工性、电火花加工性和焊接性，不单是加工性要好，而且加工质量也要好。例如，不仅容易切削及用电火花加工，而且加工后的表面质量也要好。

伴随着产品精度的上升，对模具精度的要求也越来越高，要求材料抛光后更接近于镜面，各种蚀纹加工的效果更细致均匀。为缩短成形周期，需要模具有较好的冷却能力，从而高导热性材料的需求量逐渐增加。塑料本身也逐渐趋于多样化，像用于工程塑料及纤维增强塑料的模具要求具备金属成形用模具程度的耐磨性，如是产生腐蚀性气体的塑料，还需要具有耐蚀性。

为满足多方面的要求，多种塑料模具钢得到了应用，但由于塑料行业尚属新型行业，JIS 标准当中尚未列入塑料模具钢的内容。另外，塑料模具钢涉及从碳素钢到低合金钢、高合金钢、不锈钢等多类别的钢种，而且模具加工方法和使用方法也关系到诸多方面，因此材料厂家所提供的不仅是材料本身，还要包括使用方法等关联技术。下面依次了解一下有关内容。

4.5.2　塑料模具的性能要求

塑料成形加工以注射成形为主。注射成形是将塑料加热至熔融状态后注入模具中，使其固化成形后取出的过程。此外，还有将粉末状树脂塑料装入型腔中进行加热加压成形的压缩成形；将树脂装入加料室内加热软化后用柱塞压入模腔的传递模塑成形，以及挤压成形、吹塑成形、真空成形等多种方法。

在各种塑料成形设备当中，不仅包括模具，还包括各类附带的模具零部件，不过在此将以模具为中心对其性能要求加以介绍。虽然已在本书第 3 章就模具整体进行了总结归纳，但由于塑料模具按照所用塑料种类和产品的不同，其性能要求的涉及方面极多，所以在这里再次予以整理归纳。

1. 成形使用中的性能要求

塑料模具的性能要求，主要分为使用时即塑料成形时的要求和模具制作时的要求。成形方面的要求已在本书第 3 章介绍过，包括硬度高、耐磨性好、韧性高、耐开裂性好、耐崩角性好、对腐蚀性塑料的耐蚀性好等内容。

（1）硬度　模具的耐磨性一般与硬度有关，像冷作模具钢存在大量硬质碳化物，其耐磨性较高。当用模具成形时，在分型面上会夹有残留塑料，导致合模时容易形成凹痕等，故产品批量较大时更倾向采用高硬度模具。

（2）韧性　韧性即是模具的耐冲击性或耐开裂性，与硬度和耐磨性相反。尤其模具的凸起部分及销杆类等模具部件需采用高韧性材料。

（3）耐蚀性　成形温度较高的特种工程塑料及含阻燃剂的塑料容易产生腐蚀性气体。另外，氯乙烯、氟树脂塑料等会产生氯气及氟化氢气体，所以有时会对模具有耐蚀性要求。

此外，为缩短成形周期而增强模板水冷的同时，水孔内壁生锈氧化也会影响导热效果，致使冷却能力下降。这种情况下要使用有耐蚀性的模板。

耐蚀性主要取决于合金元素的化学成分。通常含铬量较多时会在表面形成钝化膜，比如铬的质量分数达12%以上时几乎不会被腐蚀。不过，在氟气及卤素气体（氯、溴）的环境下，因其反应生成物对钝化膜有破坏作用，所以仅靠铬来增强耐蚀性是有一定限度的。另外，钼在非氧化性的腐蚀气氛中形成的稳定钝化膜有耐蚀作用。

（4）镜面性　塑料模具的成形表面质量直接决定着成形产品的表面质量，所以镜面性相当重要。比如透明制品及化妆品容器等要求型腔要达到镜面，还有用于透镜、CD、DVD成形的模具等，更需要达到超过#10000研磨号数，即0.01μm以下的微细表面精度。所谓镜面性，是指即使提高研磨号数继续进行镜面研磨也不会出现麻点（针孔），以及可得到没有波纹的精细表面程度。同时还要求在使用中该镜面能有持久性。

一般来说，硬度越高镜面性越好。这是因为不易被研磨剂擦伤，以及与硬质夹杂物及碳化物颗粒的硬度差较小，这些颗粒可与基体一起进行均匀研磨。

显微组织对镜面性的影响也较大。出现针孔的主要原因在于硬质氧化物系非金属夹杂物的脱落，所以需要使用夹杂物较少的纯净钢。另外，形成钢锭时的凝固偏析引起的显微偏析会成为研磨不均的原因，所以希望使用偏析较轻微的均质材料。因此，用于超镜面模具的材料为纯净、偏析少且富于均匀性的重熔精炼钢（VAR，ESR）。还有，要求进行超镜面抛光时，必须使用可防止表面氧化的耐蚀性不锈钢。

2. 加工制作中的性能要求

（1）切削性　由于形状复杂的塑料产品较多，其模具形状也就较复

杂，从而要求塑料模具钢的切削性要好。所谓切削性，是指切削刀具承受的切削抗力、加工面的表面粗糙度、工具寿命及切屑破碎性四个方面。一般来说，硬度越高切削抗力越大，会降低刀具寿命。另一方面，如硬度过低则会粘刀，尤其是钻孔加工时，会出现切屑不易排出的问题。

为提高切削性，常采用易切削钢。易切削钢是指在钢中加入 S、Pb 或 Ca 等易切削性元素，并形成非金属夹杂物的钢种。当加入 S 时会形成硫化物 MnS，而加入 Pb 时则成为单质颗粒，这些颗粒有促成应力集中形成缺口的效果，以及靠自身的润滑作用来减小切削抗力从而延长刀具寿命的作用。加入的 Ca 可附着于工具表面起到润滑作用，有利于延长工具寿命。由于 Pb 的熔点（327℃）较低，难以用于模具中，一般多使用 S。

（2）镜面性　镜面性是来自模具使用角度的性能要求，但如何打磨出高精度镜面，从加工制作角度来看也十分重要。

（3）蚀纹加工性　蚀纹加工主要用于汽车内饰件、家电产品和办公设备等重视外观设计的产品的成形。利用光阻法，经各种酸蚀在模具表面形成凹凸纹路，据其形态不同分别称为皮纹、梨纹、木纹等。

当存在偏析和不良组织，粗大一次碳化物和非金属夹杂物较多时，会造成腐蚀不均，以致不能得到良好的蚀纹面。另外，在堆焊时，如该部位的显微组织及硬度不均匀也会造成蚀纹不均，需特别予以注意。

（4）电火花加工性　在模具加工阶段影响模具质量的重要因素，不仅是切削加工，还有电火花线切割及电火花成形加工的电火花加工性。当然，电火花线切割相对不易发生开裂和变形。另外，电火花加工时形成的表面变质层（熔融、急冷凝固部）形成拉应力有时会产生微裂纹，需将这一变质层研磨去除后使用。因此变质层硬化程度低且容易磨掉的低碳钢较为适用。此外，对含有非金属夹杂物的易切削钢及有粗大碳化物的冷作模具钢等来说，硬质相与基体相的电火花加工性有差异，以致在其界面易出现凹点，所以选择材料时要加以注意。非金属夹杂物和粗大碳化物对电火花加工表面的影响如图 4-38[35] 所示。

（5）焊接性　模具出现磨损、破损及开裂等问题后，对损伤部位进行修补以及变更设计，还有弥补加工失误等都会用到堆焊修补，因此希望塑料模具钢能容易进行堆焊，不易发生焊接开裂及焊接空隙

等。尤其是对于重视外观质量的型腔表面，关键在于要让补焊部位与母材之间不产生光泽差及硬度差。

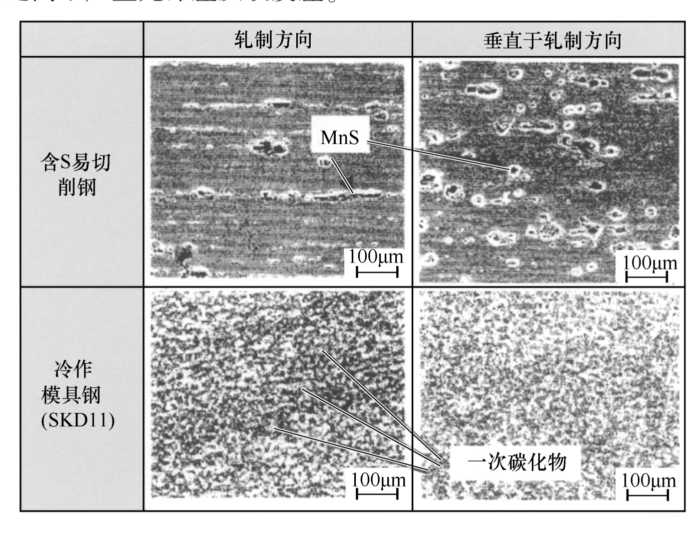


图 4-38　非金属夹杂物和粗大碳化物对电火花加工表面的影响

4.5.3　塑料模具钢与性能定位

如前所述，JIS 标准当中并未制定塑料模具钢的内容。外国标准当中，美国的 AISI 标准将利用冷挤成形方式制模并经渗碳后使用的低碳-Ni-Cr-(Mo) 钢作为 P2 ~ P6 钢种制定成标准[36]。

用于机械加工制模的钢材当中，P20（0.34% C-0.80% Mn-1.7% Cr-0.43% Mo）和 P21（0.20% C-0.30% Mn-≤0.50% Cr-4.1% Ni-0.20% V-1.15% Al）较为著名，通常在 30 ~ 36HRC 的预硬状态下得到使用。还有作为耐蚀钢标准，也有三种 13Cr ~ 17Cr 的马氏体系不锈钢。另外，欧洲厂家制造出以 P20 钢为基础的改良钢种。除此之外，热作模具钢、冷作模具钢、表面硬化钢、渗氮钢、析出硬化钢等也得到了应用[37]。

表 4-17 为塑料模具钢的化学成分及性能要求。作为参考，将塑料模具钢的牌号对照表列于表 4-18[38] 中。表中数据自上而下按硬度及

表 4-17　塑料模具钢的化学成分与性能比较

区分	JIS 牌号系列	大同 牌号	AISI 牌号	使用硬度 HRC	化学成分（质量分数,%） C	Ni	Cr	Mo	V	其他	性能比较 切削性	镜面性	蚀纹加工性	焊接性	耐磨性	韧性	热处理尺寸变化	耐蚀性
预硬	SC 系	PXZ	1055	(30HS)	低 C-Mn 钢					S	5 + +	3	4	5 +	1	5	—	2
	SCM 系	PDS3	4140	26 ~ 30	0. 45	—	1. 1	0. 25	—	—	4	4	4	4	3	4	—	3
		PX5	P20	30 ~ 33	0. 20	—	2	0. 50	—	S	5	5	5	5 +	3	5	—	3
	SUS 系	G-STAR	420F	33 ~ 37	0. 35	—	16	1	—	S	4	3	4	4	3	4	—	4
	析出硬化系	NAK55	P21 改	37 ~ 43	0. 15	3. 0	—	0. 3	—	Cu，Al,S	5 +	5	4	3	3	1	—	3
		NAK80		37 ~ 43	0. 15	3. 0	—	0. 3	—	Cu，Al	3	5 +	5 +	3	3	1	—	3
	SKD 系	DH2F	H13 改	38 ~ 42	0. 38	—	5. 3	1. 3	1	S	4	3	3	3	4	3	—	3
淬火回火	析出硬化系	NAK101	630 改	30 ~ 35	17Cr—4Ni 系					—	2	4	4	4	3	5	—	5 +
	SKD 系	DHA1	H13	45 ~ 50	0. 39	—	5	1. 3	1	—	4	4	4	3	4	4	4	3
		DC53	D2 改	60 ~ 62	0. 90	—	8	2	0. 3	—	4	5	4	2	5	2	3	4
		PD613	D2 改	56 ~ 61	8Cr—1Mo 系					—	4	5	4	2	5	3	3	4
	SUS 系	S-STAR	420 改	50 ~ 53	0. 38	—	13. 5	0. 1	0. 3		3	5 +	5	3	5	3	4	5
马氏体时效钢		MAS1C	—	50 ~ 53	≤0. 03	18. 5	—	5	—	Al,Ti，Co	3	5 +	5 +	5 +	4	5 +	5	3

注：性能中的数字含义为 1（差）→5（良好）。

表 4-18　塑料模具钢牌号对照表

预硬	硬度 HRC	JIS	AISI	爱知	JFE	神户	山阳	住友	大同	高周波	日立	不二越	Uddeholm	Boehler
预硬	13	SC	1055	AUKI	JFE-MD1	KTSM21 KTSM2A KTSM22	PC55	SD17 SD18T		KPM1 KPMAX				
	28	SCM	4140	AUK11	JFE-MD3 JFE-MD5	KTSM31		SD61	PDS3					
	33	SCM-M	P20			KTSM3M	PCM30	SD70 SD100	PX5	KPM30	HPM7		PLAMAX IMPAXHH	M200 M201 M238
		SUS	420						S-STAR D-STAR	420M	HPM38		STAV AX	M303 M310
		SUS (F/M)							G-STAR		HPM77		RAMAX-2 Roy Alloy	M315
	35	SUS	S17400				QSH6		NAK101	U630	PSL		CORRAX	N700
		SKD61-M	H13						DH2F	KAP90F	FDAC			
	40	其他	P21				PCM40 PCM40S		NAK55 NAK80	KAP65 KAP88	HPM1 HPM-PRO			M261 M461
			P21①								CENA1			
											HPM-MAGIC		NIMAX	

（续）

预硬	硬度 HRC	JIS	AISI	爱知	JFE	神户	山阳	住友	大同	高周波	日立	不二越	Uddeholm	Boehler
淬火 回火	60	SKD11 -M	D2				QCM8		PD613	KD21	HPM31		RIGOR SLEIPNER CALDIE CALMAX	K105 K110 K340
	57	SUS440C -M	440C				QPD5 SPC5 （P/M）		SUS440C		SUS440C	440C	UNIMAX ELMAX	M340，M390 N685，N690 N695
	52	SUS 系 420							S-STAR D-STAR G-STAR		HPM38 HPM38S HPM7		STAVAX POLMAX MIRRAX	
时效 硬化	≥50	马氏体 时效钢							MAS1C	KMS18 -20	YAG	NAG21		
		其他									ASL407		CORRAX	
	40	非磁性钢								NMS1	HPM75			

① 耐锈。

合金化程度由低到高排列，并按模具制作时是否需要热处理大致分为预硬钢和淬火回火钢。如图4-39所示，预硬钢是指材料厂家预先进行热处理后提供的模具钢，模具厂家可加工成模具后直接交付使用，而无须热处理。最近，随着加工设备及刀具的发展，即使硬度超过50HRC的材料也可切削加工。不过，对应工业上大量生产所用的硬度约为40HRC，所以通常预硬钢的硬度上限也大致在40HRC。

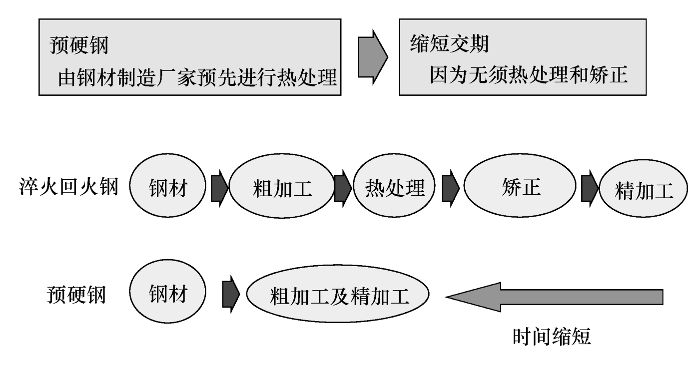


图4-39　预硬钢的特点

塑料模具钢种群主要有低硬度的碳素工具钢及其改良钢、铬钼钢、析出硬化型钢种及相当于SKD61钢的易切削钢（大同DH2F）等。低C-Ni-Al-Cu系析出硬化型钢是在固溶处理后，经时效处理析出微细颗粒而达到硬化的钢种。比如NAK55钢及NAK80钢（大同品牌）在固溶化处理后硬度为30HRC，但经500℃时效处理后，其析出硬化的硬度可达到40HRC左右。

相对而言，所谓淬火回火钢，是指以退火状态供货，加工后通过淬火和回火来达到指定硬度的钢种。整体来说有热作模具钢、冷作模具钢、高碳马氏体不锈钢等，在45～60HRC高硬度下使用的钢种。还有，属于超强钢的析出硬化型马氏体时效钢，不但强度高，而且韧性也好，所以用于制作要求耐开裂性及耐缺口性的各种销杆类的零件。

表 4-19 为塑料模具钢的物理性能和力学性能。在物理性能中，各种钢的密度和杨氏模量（纵向弹性模量）的差异很小且几乎固定。特别是杨氏模量不受硬度的影响，即使提高强度也不会使其增大，也就是说模具刚性不变。热导率随合金化的增加而下降，因此考虑模具冷却效果时需要注意。另外，表 4-19 中所给力学性能是采用硬度范围中间值时的实测值。

接下来看一下各种塑料模具钢的性能定位。如图 4-40 所示，为便于分析整体状况，将镜面度和硬度分别作为两坐标轴来表示各钢种的定位。镜面度是利用机械研磨抛光时的磨料号数来定性表示的。此外，还给出了各镜面度所对应的成形用途。如前所述，一般来说，硬度越高镜面性越好，适用于透明产品及超镜面产品的模具。在此以同等硬度进行比较可得知，特别是在超过 50HRC 的范围，马氏体不锈钢镜面研磨性要比冷作模具钢好，重熔精炼钢要比大气熔炼钢要好。

表 4-20 为各种塑料模具钢的用途及产品举例。

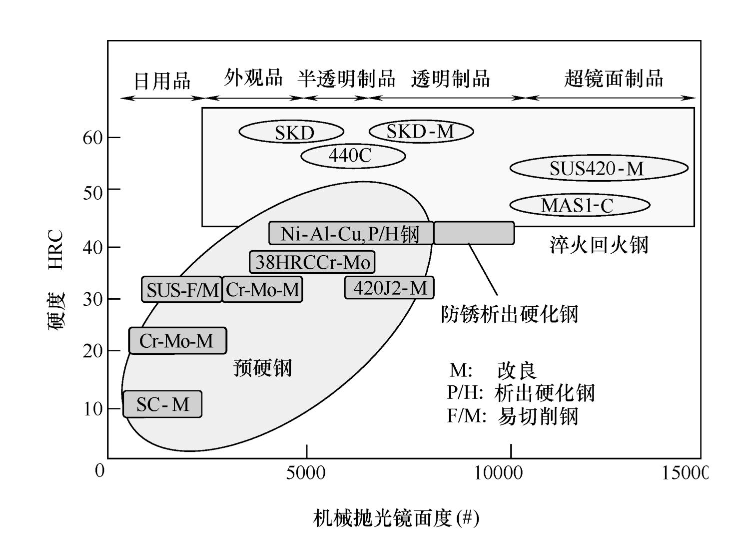


图 4-40 塑料模具钢的性能定位

表 4-19　塑料模具钢的物理性能和力学性能

分类	大同牌号	硬度 HRC	物理性能				力学性能			
			密度/(g/cm^3)	杨氏模量/MPa	热膨胀系数 $\times 10^{-6}$/K (20～200℃)	热导率/[W/(m·K)]	0.2%屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	伸长率(%)	冲击韧度/(J/cm^2)
预硬钢	PXZ	26～35HS	7.85	207000	13.1	43.1	490	760	25	50～70
	PDS3	26～30	7.85	206800	12.0	43.5	745	890	23	40～60
	PX5	30～33	7.85	207300	12.7	42.3	911	1030	20	60～90
	G-STAR	33～37	7.80	199900	11.0	25.1	855	1060	16	12
	NAK55	37～43	7.80	200900	12.5	41.8	1010	1250	15	18
	NAK80	37～43	7.80	200900	12.5	41.8	1010	1250	15	22
	DH2F	38～42	7.75	205800	10.8	25.5	1130	1320	10	40
	NAK101	30～35	7.80	200900	11.1	25.1	970	1100	10	80
淬火回火	DHA1	45～50	7.75	205800	10.3	26.8	1270	1420	9	40
	DC53	60～62	7.87	212700	12.0	23.9	—	—	—	30①
	PD613	56～61	7.80	212700	11.7	26.3	1810	2250	2	45①
	S-STAR	50～53	7.80	214500	11.1	23.9	1540	1940	9	25
马氏体时效钢	MAS1C	50～53	8.02	182300	10.1	28.8	1910	2170	10	50

①　指10R缺口，其余为2mm的U型缺口。　夏氏冲击值：2mm U缺口. ＊＊10R缺口

表 4-20　塑料模具材料的用途及产品举例

分类	JIS	大同牌号	AISI	硬度 HRC	用　　途	
					主要用途	产品举例
预硬	SC	—	1055	30HS	·一般大型模具 ·蚀纹模具	·保险杠、散热器格栅、仪器仪表面板 ·按制箱、日常用品 ·家用电器、玩具
	SCM	PDS3	4140	26～30	·一般大型模具	·尾灯、镜框、保险杠、散热器格栅 ·电视外壳、电脑、电话
		PX5	P20	30～33		
	SUS	G-STAR	420F	33～37	·耐蚀模具	—
	P/H	NAK55	P21-M	37～43	·精密长寿命模具	·键盘、摄像机、数码相机 ·手机 ·平面电视机、手机、视听器材 ·透明盖板、前灯
		NAK80		37～43	·精密长寿命模具 ·镜面抛光模具	
	SKD	DH2F	H13-M	38～42	·耐磨模具	·型芯销
	P/H	NAK101	630M	30～35	·耐蚀模具	·雨水管槽、埋入管道
淬火回火	SKD	DHA1	H13	45～50	·耐磨模具	·一般工程塑料制品
		DC53	D2M	60～62		
		PD613	D2M	56～61	·精密长寿命模具 ·耐磨模具	·微动开关、连接器、齿轮
	SUS	S-STAR	420M	50～53	·精密长寿命模具 ·镜面模具 ·耐蚀模具	·相机、CD 镜头、光学镜片 ·手表盖
马氏体时效钢		MAS1C	—	50～53	·高寿命销杆	·小直径销杆

4.5.4 特殊的塑料模具钢

1. 低 C-Ni-Al-Cu 系析出硬化型钢

该类钢的代表为 NAK55 及 NAK80（大同品牌）。它们在 20 世纪 60 年代后期相继得到开发[39,40]，20 世纪 70 年代得以量产。它们作为高性能塑料模具钢，不仅在日本国内，而且在中国、东南亚等国家和地区也得到了普及。

NAK 钢以 0.1% C-3% Ni-1% Al-1% Cu 为主要化学成分，其中的 NAK55 钢是硫的质量分数为 0.2% 的易切削钢，NAK80 钢则将硫的质量分数控制在 0.003% 以下，为了达到更高镜面性的钢种。

图 4-41 所示为析出硬化钢的强化机理，图 4-42 所示为低 C-Ni-Al-Cu 系析出硬化钢 NAK 的特性。在固溶化加热状态下，组织变成奥氏体相，其后冷却时基体成为呈现原奥氏体晶界的贝氏体组织。然后加热到约 500℃，使固溶于基体中的 Ni、Al、Cu 以 Ni_3Al 及 Ni_3Cu 在基体内析出。此时产生的微细应变使基体得到强化，硬度上升到 40HRC 左右。

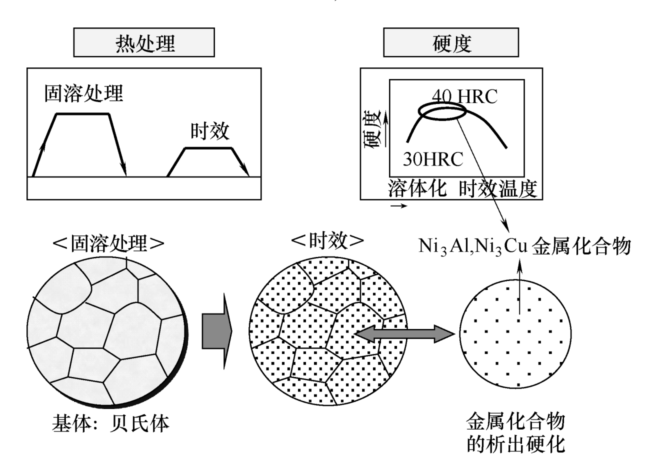


图 4-41 析出硬化钢的强化机理

该预硬钢的硬度可达 40HRC，所以不仅耐磨性较好，而且具备预硬析出硬化型钢所特有的长处。首先是韧性虽低，但切削性出色。

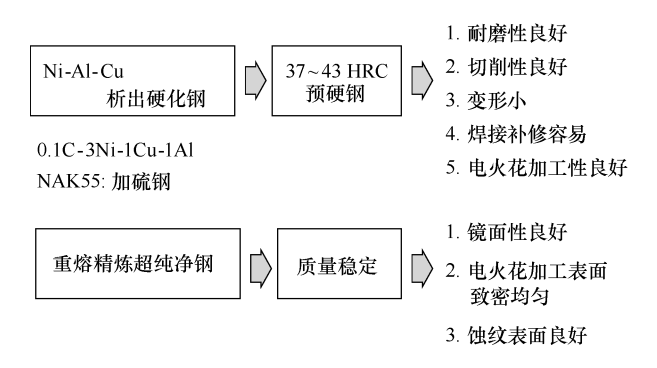


图 4-42　低 C-Ni-Al-Cu 系析出硬化钢 NAK 的特性

其次是预硬钢不用担心热处理尺寸变化和热处理变形。再次是进行堆焊及电火花加工时，即使局部升温超过相变点，冷却后也只是形成固溶体，并由于是低碳成分，所以硬度只有 30HRC 左右，不用担心局部出现淬火开裂。同时，电火花加工时变质层也较容易研磨清除。修补时用同种金属焊接后再以时效温度加热并保温，相当于进行了时效处理，硬度可回升到初期的 40HRC 左右。由此可消除焊接部分与母材的硬度差异，在后续进行蚀纹加工、镜面研磨抛光等时也会得到与母材相同的效果，看不出痕迹。图 4-43 所示为焊接之前和时效处理后的蚀纹加工面及研磨面的对比。由此可了解到焊接部位时效后呈现出与母材相同的均匀蚀纹面和研磨面。

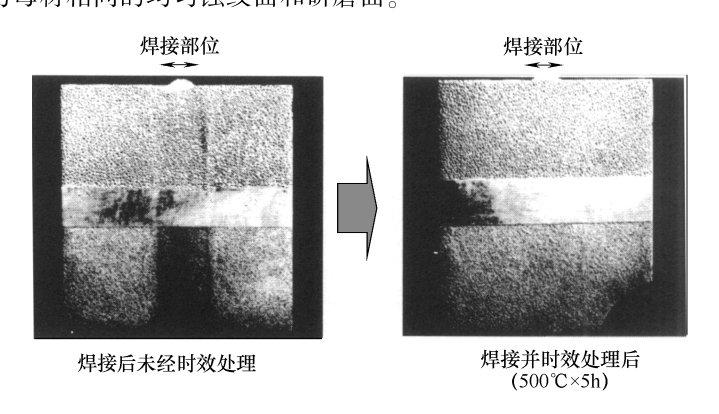
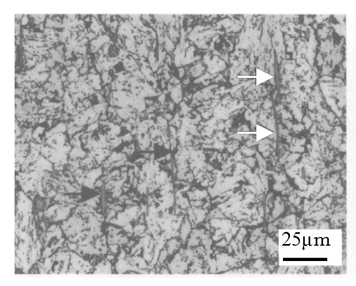


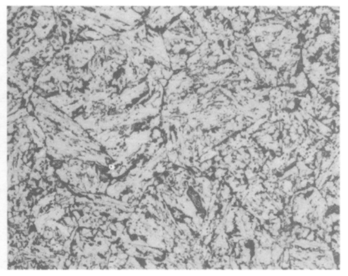
图 4-43　析出硬化钢的焊接修补特点

进一步来看，NAK 钢是重熔精炼钢。其中的 NAK55 钢采用的是真空电弧重熔（VAR），NAK80 钢采用的是电渣重熔（ESR），均可形成纯净均匀且微细的组织。

图 4-44 所示为 NAK 钢（NAK55 和 NAK80）的显微组织。NAK55 钢为改善切削性而加入了 S，可看到其硫化物的分布。其硬度虽然达 40HRC，却与硬度为 30HRC 的 Cr-Mo 钢具有相同的切削性。



NAK55钢(箭头所指为MnS)



NAK80钢

图 4-44　NAK 钢的显微组织

NAK 钢广泛用于汽车内饰件、家电、办公自动化设备的壳体、化妆品容器等塑料产品的成形。特别是 NAK80 钢适用于镜面研磨和电火花加工表面要求高的模具，NAK55 钢则发挥其易切削的特性，除了用于注射成形模具外，还用于橡胶模及各种夹具配件等。

目前被称为黑亮面的液晶电视的黑色外框需求量有所增加，所用模具的镜面要求也更加严格。作为无痕成形工法的急冷急热（H&C）成形法得到了广泛应用，由于模具水孔中需通入水蒸气，因此提高耐蚀性已成为当务之急。为此，析出硬化型的 NAK 钢种得到了进一步改善[41,42]。

2. 硬度为 33HRC 的低 C-Cr-Mo 系钢

这是 AISI 的 P20 改良钢种，属于铬钼钢。许多厂家都在生产同类钢种，其中的 PX5 钢[43]是 0.20% C-2% Cr-0.4% Mo 系钢，并加入 S 元素改善了切削性，与 P20 钢相比，加工效率可提高 30%。

该钢属于大气熔炼材料，其特点是含碳量低，从而造成在电火花

加工时产生的熔融凝固变质层的硬度也低，所以变质层的研磨清除较容易，并且焊接开裂敏感性较低，焊接时的预热和后热，即使以较简单的方式进行也不易产生焊接开裂。这是一种通用塑料模具钢，常用于制作汽车各种内饰件、车灯透镜、家电和立体音响设备的外壳、办公自动化设备等。

目前，硬度由 33HRC 提升到 38HRC 左右的铬钼钢也得到了应用。

3. 高硬度耐蚀塑料模具钢

作为耐蚀钢，SUS420J2（0.33% C-13% Cr）的许多改良种得到了开发。其中瑞典 Uddehom 公司制造的 STAVAX 钢问世较早，在世界范围得到了普及[44]，许多厂家也在制造同类钢种[45]。该类钢是重熔精炼钢，经淬火和回火后硬度可达 53HRC，并且具有出色的镜面性，适用于透明制品、透镜及 CD 等模具的制造。另外，其在 300℃ 回火时的热处理尺寸变化极小，仅为 ±0.01% 左右，常用于精密模具。用于 DVD 模具的材料当中，还有经两次重熔精炼，即所谓的三次熔炼钢，从而得到更纯净的超高镜面钢。

再者，由于铬系不锈钢不耐氯气的腐蚀，因此 SUS630（17% Cr-4% Ni）等钢也得到了应用。

4.5.5 塑料模具钢的选用方法

塑料成形的种类繁多，因此塑料模具钢的选用难度也就较大。通常以塑料种类和特性为基础，并考虑模具加工和成形厂家的需求，再配合成形数量来选用最适合的钢种。

图 4-45 所示为塑料模具钢的选用方法[46]。酚醛树脂、密胺树脂、环氧树脂、聚酯树脂等热固性塑料，以及聚乙烯、聚丙烯、ABS 等热塑性塑料的成形模具，使用 33HRC 级 Cr-Mo 系模具钢。要增加成形数量的话，可选择 40HRC 级的 NAK 钢或更进一步选择 60HRC 级的冷作模具钢等高硬度高耐磨性的材料。

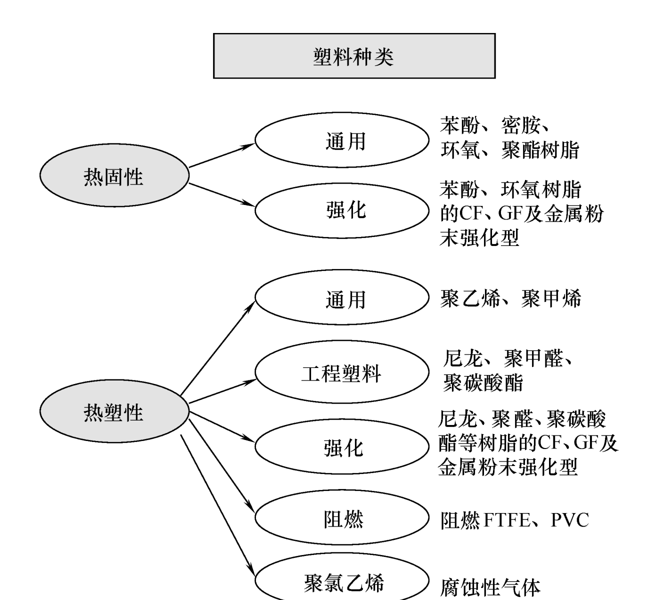
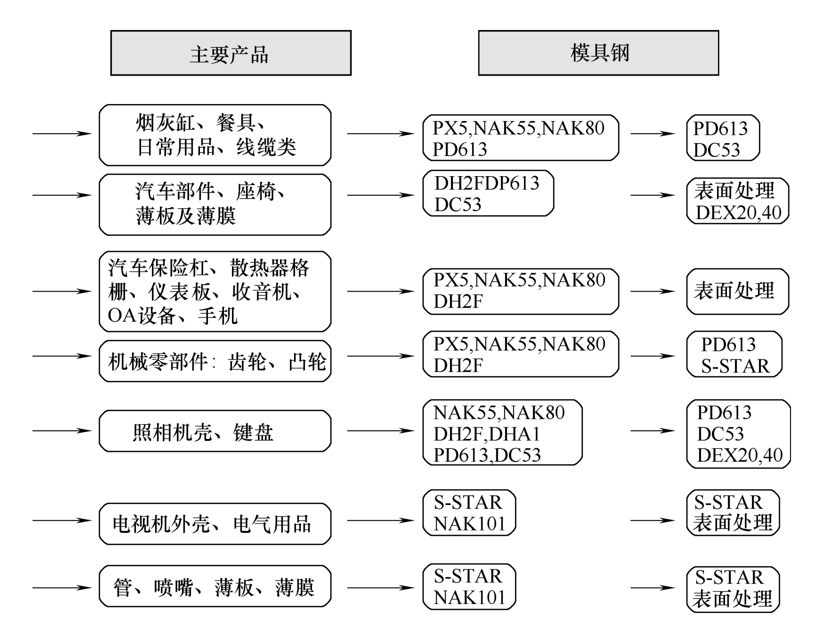


图 4-45　塑料模

尼龙、聚甲醛、聚碳酸酯等工程塑料及掺入玻璃纤维和金属粉末的强化塑料所用的模具，要求具有高耐磨性，需用热作模具钢及冷作模具钢，有时也会用到耐磨性更高的粉末高速钢和粉末马氏体不锈钢等。如果模具耐磨性仍不能满足要求，可对其表面施以镀层处理。

对于需要添加阻燃剂的塑料、聚氯乙烯及氟塑料的成形模具，当小批量生产时，可用铬钼钢配以电镀处理，大批量生产时用高硬度不锈钢，生产量更多时配以电镀处理及表面镀层等。按此原则形成的选用方法仅是一种指标，并不适用于所有模具钢。因此，按此方法基本选择后，还要根据实际数据来选定最恰当的材料。

当通过选用较高价的高级模具钢来提高模具的使用寿命时，可以实现降低产品单价从而削减综合成本。不过也有为了降低模具材料费用而使用低档次模具材料的倾向，致使模具负荷过重而出现各种问题，这也是在选用材料时值得注意的现象。



具钢的选用方法

4.5.6 塑料模具的制作技术

当制作高精度要求的塑料模具时，不仅要正确选择模具材料，还要对镜面研磨抛光、电火花加工、焊接性等有关模具加工制作技术予以注意。为更加有效地利用模具材料，在这里就以下三方面加以叙述。

1. 研磨抛光

塑料模具的镜面研磨抛光方法如图 4-46 所示。基本上是按磨削、砂纸研磨、抛光的操作方法，由粗到细分步骤依次研磨。不过当改变研磨方法时，应注意将所用研磨材料的粗细号数递减一级后研磨，然后再逐步提高。提高研磨号数时，应注意研磨方向要垂直于上一道的研磨方向，并一定要将上道磨痕完全磨掉。至于研磨时间，在研磨号数所能达到的程度范围内应越短越好。

研磨时间过长易将非金属夹杂物抛出而形成针孔。更为重要的是，不同钢种所能达到的研磨号数，也就是表面粗糙度是有限的，超出钢种

限度的研磨号数，不管怎么研磨都不会达到要求，反而容易出现针孔。

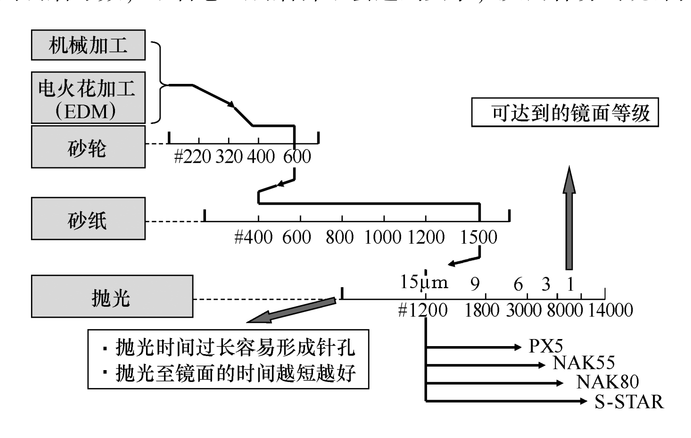


图 4-46 **塑料模具的镜面研磨抛光方法**

2. 电火花加工

电火花加工时，加工表面会被置于5000℃的高温中，所以表面超过熔点后会熔化并急速冷却凝固。另外，当切削液为油性液体时，有时会出现切削液分解渗碳现象。其结果会在表面形成10μm厚的高硬变质层，并由于此时为拉应力而会产生微裂纹。因此，在电火花加工及线切割加工后，注意要将加工表面研磨后再交付使用。图4-47所示为电火花加工表面变质层的形态及去除方法[35]。

3. 焊接性

堆焊修补时，注意要先将开裂及缺损等损伤部分用砂轮等完全清除，并用比色检测等方法加以确认看是否有残存裂纹缺陷，这点很重要。然后根据模具材料的不同，焊料可考虑选用同种或其他材料。对高合金模具钢来说，常选用比母材含碳量稍低的硬化堆焊用焊条作为焊料。接下来预热后，用TIG焊进行堆焊。随后进行与钢种相应的焊后热处理来降低应力，防止焊接开裂。

如前所述，低C-Ni-Al-Cu钢及马氏体时效钢等的析出硬化钢，焊接后未进行热处理前，因处于固溶状态，故硬度较低，但只要配以相当于焊后热处理的时效处理，即可恢复到原有的硬度，所以是适于堆

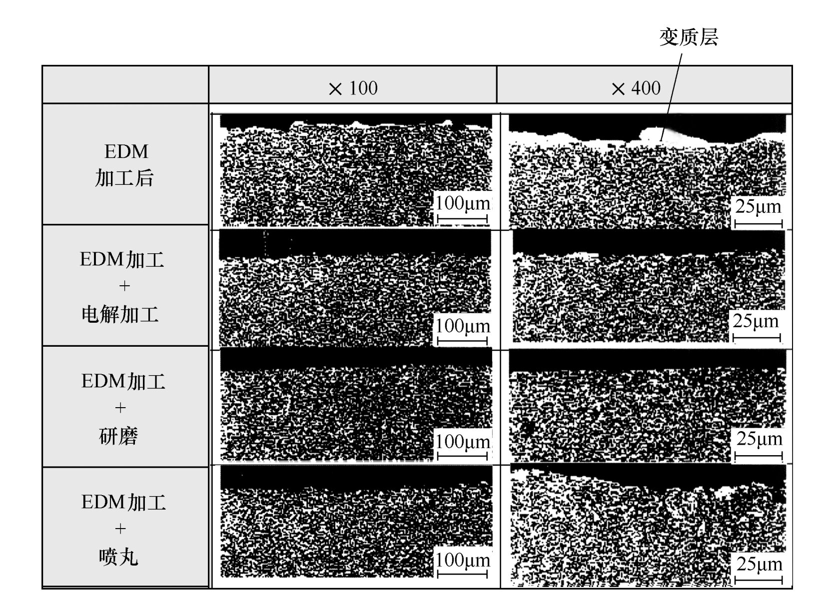


图 4-47 电火花加工表面变质层的形态及去除方法

焊的钢种。

4.6 橡胶模具和粉末成形模具材料的选用

橡胶的成形方法大致分为压缩成形、传递成形、注射成形。通常来说，制作此类模具时适合使用塑料模具钢，并按加工性和镜面性要求选用不同钢种。另外，有些橡胶会产生腐蚀性气体，所以与塑料模具钢一样会用到不锈钢系的模具钢。

玻璃成形分为人工成形法和机械成形法，后者主要用模具来大量生产玻璃瓶和玻璃板。比如，玻璃瓶成形又分为反复吹塑以及压制与吹塑组合的两种方法。

另外，餐具等的成形，则是将熔融玻璃（料滴）送到模具中，靠模腔与冲头压制成形。一般都要用到 SUS420J2 等马氏体不锈钢。

粉末冶金是将粉末加压成形后，在熔点以下的温度进行加热烧结

来制成各种金属产品的过程。粉末成形即为其最初工序。其特点是可以对其他方法所达不到的高熔点和高纯度金属以及复合材料（金属+非金属）和多孔金属材料进行成形。压缩成形方式最为普遍。其模具多采用硬质合金制作，有时也会用到工模具钢当中重视耐磨性的高速工具钢及冷作模具钢。药片的成形及刻印，从广义来说也属于粉末成形，其模具采用冷作模具钢制作。

4.7 有色金属

除了以上所述铁系模具钢之外还包括有色金属模具材料，用于小批量生产或特殊用途。

4.7.1 锌合金、铜合金和铝合金

锌合金的熔点较低，在400℃以下，其铸造性较好，一直被用于制造试验模具及小批量成形模具。

铜合金的热导率约为铁的5倍。所以 $w(\mathrm{Be})=0.5\%\sim3\%$ 的Be-Cu（铍铜）合金，可发挥良好的冷却性能，用于制作以缩短成形时间（周期）为目的的塑料模具。目前，以镶块形式而非整体模具来达到局部冷却效果的复合模具也得到了广泛应用。

铝合金与模具钢相比，切削性良好、质量轻、热导率也高，但曾经存在强度较低的问题，不过近期开发出强度可与碳素钢匹敌的铝合金，被用于制作塑料模具[47]。近来，塑料瓶吹塑成形生产量急速增长，铝合金良好的冷却性能，对缩短成形周期作出了贡献。

有色金属的物理性能和力学性能见表4-21。

4.7.2 硬质合金

硬质合金是将碳化钨（WC）细粉或添加碳化钛（TiC）后，与作为粘结金属的钴粉末混合，并经加压成形后于1300~1500℃高温烧结制成的合金材料。其硬度达90HRC左右，显然高于通常的工模具

钢，主要用来制作切削刀具（刀片）。

表 4-21　有色金属的物理性能和力学性能

材料 \ 性能		硬度 HBW	抗拉强度 /MPa	伸长率 (%)	杨氏模量 /MPa	密度/ (g/cm^3) 20℃	热膨胀系数 × 10^{-6}/K	热导率 [W/(m·K)]
碳素钢	S50C	180	610	18	206000	7.9	11.7	48
Zn 合金	4% Al-3% Cu-Zn	120	>28	4	100000	6.5	28.7	108
Cu 合金	2% Be-Cu	340	340	8	131000	8.4	17.0	130
Al 合金	7075	155	530	6	72000	2.8	23.6	124
Al 合金	Almigo Hard	197	650	10	73000	2.8	23.4	144

注：热导率值为 200℃下的测量值。——编者注

用于模具的硬质合金主要是碳化钨系列，常用来制作冲裁模、弯曲模、拉深模、刻印模及冷锻模等。像拉丝模和镦锻模等几乎都要用硬质合金制作。硬质合金硬度高，故耐磨性好，耐压缩能力强，不过也有不耐拉伸的缺点。因此，圆形模具需要辅以工模具钢加强圈，方形模具需要辅以加强板。

参考文献

[1] JISハンドブック①鉄鋼Ⅰ，日本規格協会（2013）
[2] JISハンドブック①鉄鋼Ⅰ，日本規格協会（2013），p1632
[3] JISハンドブック①鉄鋼Ⅰ，日本規格協会（2013），p1652
[4] JISハンドブック①鉄鋼Ⅰ，日本規格協会（2013），p1642
[5] 特殊鋼，vol. 59（2010），No. 6，p11
[6] 特集，新しい特殊鋼，活用ハンドブック：特殊鋼，vol. 50（2001），No. 11，p38
[7] 太田久司，倉田征児，並木邦夫：電気製鋼，vol. 71（2000），No. 2，p171
[8] 特集，新しい特殊鋼，活用ハンドブック：特殊鋼，vol. 50（2001），No. 11，p38

［9］特集，新しい特殊鋼，活用ハンドブック：特殊鋼，vol. 50（2001），No. 11，p12，14，16，17，19
［10］小松原周吾，久保田邦親，鳴海雅稔，山岡美樹：型技術，vol. 19（2004），No. 8，p72
［11］清水崇行，井上幸一郎，関谷篤：電気製鋼，81（2010），No. 1 p53
［12］C. A. Roberts et al：U. S. Patent，3117863（1964）
［13］内田憲正，田村庸：金型技術，No. 222，p192
［14］松田幸紀，柳沢民樹：電気製鋼，vol. 68（1997），No. 2，p123
［15］中浜俊介，松田幸紀，並木邦夫，尾崎公造：電気製鋼，vol. 76（2005），No. 4，p279
［16］松田幸紀，須藤興一，常陸美朝：電気製鋼，vol. 60（1989），No. 4，p311
［17］松田幸紀，森脇耕三，並木邦夫：型技術，vol. 16（2001），No. 8，p64
［18］高橋学：ふぇらむ，vol. 7（2002），No. 11，p870
［19］熱間金型の寿命改善委員会（型技術協会）：「熱間用金型の寿命対策」，日刊工業新聞社，（2001），p172
［20］森下弘一：第 209 回，組成加工シンポジウム，（2002），p11
［21］特殊鋼，vol. 59（2010），No. 6，p
［22］西直美：日本熱処理技術協会，熱処理応用講座「金型の損傷事例－ダイカスト型」，（2004）
［23］製品紹介：電気製鋼，vol. 71（2000），No. 2，p183
［24］須藤興一：電気製鋼，60（1989），p367
［25］DHA-W
［26］DH31-EX
［27］井上幸一郎，大藤孝，市岡雄二，荒木利彦：電気製鋼，vol. 76（2005），p287
［28］奥野利夫：鉄と鋼，vol. 69（1983），p655
［29］相澤力：電気製鋼，vol. 57（1986），No. 3，214
［30］大木健二，小林喜一，須藤興一：型技術，vol. 13（1998），No. 8，p56
［31］North American Die Casting Association：NADCA #207（2011），Special Quality Die Steel & Heat Treatment Acceptance Criteria for Die Casting Dies

[32] 河田一喜：電気製鋼，vol. 76（2005），No. 4，269
[33] 池永勝：熱処理技術協会，第 4 回熱処理技術セミナー（2004），2 月
[34] 日本プラスチック連盟資料：2012
[35] 市川二朗：第 26 回型技術セミナー（1996），p96
[36] G. A. Roberts，R. A. Cary：Tool Steels 4th Edition，American Society for Metals，（1980）p. 236
[37] 田部博輔：型技術，vol. 20（2005），No. 8，p105
[38] 特殊鋼，vol. 59（2010），No. 6，p
[39] 渡辺敏幸，浅田千秋：電気製鋼，vol. 37（1966），No. 1，p41
[40] 渡辺敏幸，朝田千秋：電気製鋼，vol. 41（1970），No. 1，p27 など
[41] 中津英司，遠山文夫，田村庸：型技術，23（2008），8，p. 98
[42] NAK-Premium
[43] 高橋国男：特殊鋼，vol. 44（1995），No. 11，p12
[44] Uddeholm 社カタログ：
[45] 大同特殊鋼カタログ：大同の高級プラスチック金型材
[46] 製品紹介：電気製鋼，vol. 71（2000），No. 2，p175
[47] 大同アミスター：アルミーゴHard，商品紹介

专栏 5

浅谈钢种牌号的含义

JIS 标准中所规定的工具钢分类标记有碳素工具钢 SK，合金工具钢 SKS、SKD、SKT，高速工具钢 SKH，然后分别在各类标记后加上数字来作为钢种牌号。该命名当中混杂着日语和英语的标记。前面的两个字母 SK 分别为英语 Steel 和日语“工具”一词的罗马字标记“KOUGU”的字头，后面为区分各钢种的附加记号。

碳素工具钢直接用 SK 标记，后面没有附加记号；特殊工具钢的标记 SKS 是在 SK 后附加 Special（特殊）的首字母 S，模具

钢的标记 SKD 是在 SK 后附加 Dies（模具）的首字母 D，锻模钢 SKT 是在 SK 后附加日文罗马字标记 TANZOU（锻造）的首字母 T，高速工具钢 SKH 是在 SK 后附加 High Speet（高速）的首字母 H。

美国的 AISI 标准当中，将碳素工具钢按水淬钢和油淬钢分别标记为 W1（Water Quenching 的 W）和 O2（Oil Quenching 的 O），空冷钢则标记为 A2（Air Hardening 的 A），模具钢标记为 D2（Die Steel 的 D）等，而钼系高速工具钢却标记 M2（Molybdenum 的 M）等，因此也不能说具有统一性。

另外，此类标准钢之外，还有各钢厂自己的品牌标记。

第 5 章

赋予模具活力的热处理

特殊钢的定义之一就是“在热处理之后使用”。赋予模具性能和功能的便是热处理。

所谓热处理，是利用金属的晶体结构变化影响性能这一特点，使特殊钢的性能充分发挥出来的技术方法。因此说材料与热处理相结合才使模具具有活力也不为过。

本章将针对热处理的基础知识和模具材料的热处理应用加以阐述。

5.1　何谓热处理

5.1.1　模具材料的热处理

模具制作过程与热处理的关系如图 5-1 所示。当需要制作模具时，首先是准备模具材料，然后按模具的设计要求粗加工后，再按性能要求进行淬火和回火等热处理。因为模具用来大批量生产各种材料成形产品，所以往往需要其具有耐磨性、耐开裂性及耐蚀性等。另外，对精加工后的模具进行表面硬化处理及镀膜等，在广义上也可称为热处理。

前面谈到的预硬钢，模具厂家将其加工成模具后可直接交付使用，无须热处理，是因为材料在出厂前已经预先进行了所需热处理。

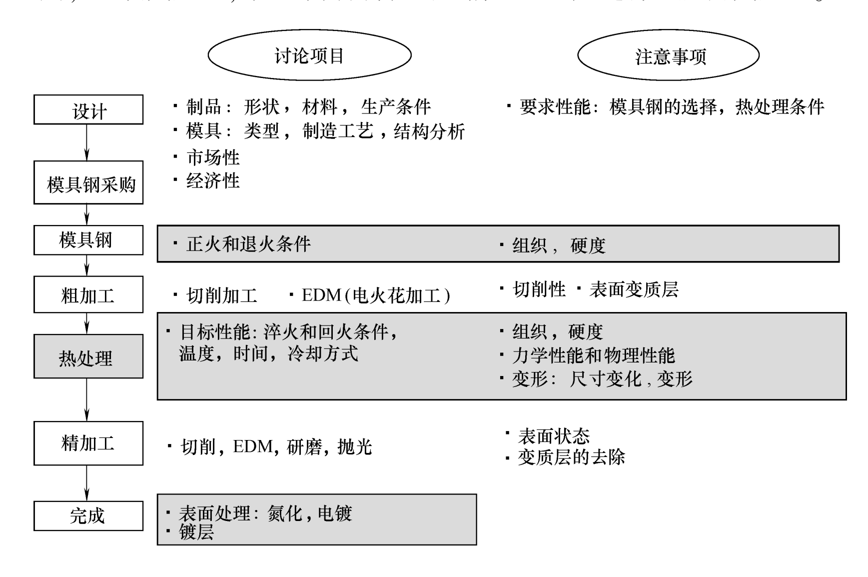


图 5-1　模具制造过程与热处理的关系

5.1.2　热处理与相变

那么何谓热处理呢？共析钢热处理的原理图如图 5-2[1] 所示。这

是伴随共析钢［w(C)≈0.8%，其余为 Fe，JIS 碳素工具钢中的 SK85 与其最为相近］的加热和冷却过程所显示出的组织及晶体结构的变化。

原始组织是材料出厂时的球化退火组织，即铁素体（碳在 α-Fe 中的固溶体）上分散着球状碳化物（渗碳体，Fe_3C）的组织。从晶格结构（金属原子的排列状态）来看，铁素体呈体心立方晶格（BCC，Body Centered Cubic），渗碳体呈三斜晶系晶格（Orthorombic）。所谓晶格，是指铁（Fe）和碳（C）等的原子排列方式。

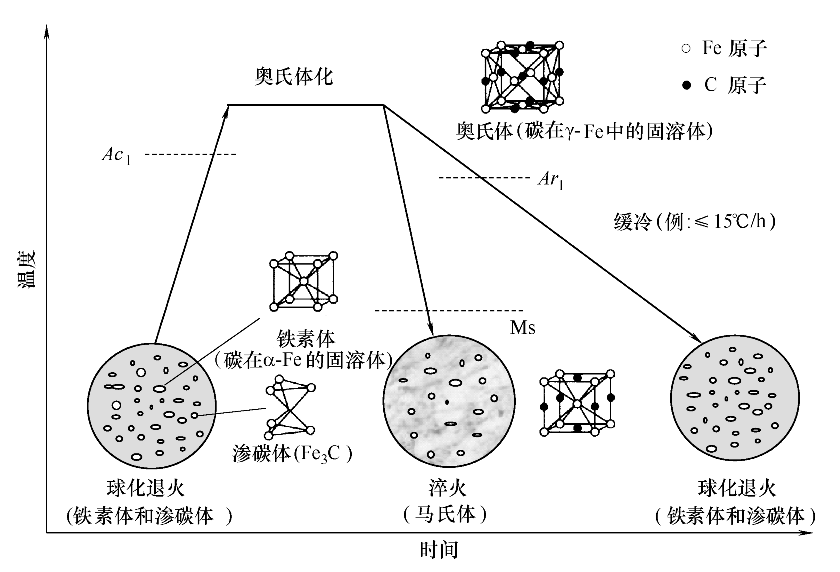


图 5-2　共析钢热处理的原理图

共析钢在加热到 800℃ 的过程中，从加热相变点（Ac_1 点㊀）开始发生转变，并随温度的上升逐渐向奥氏体（碳在 γ-Fe 中的固溶体）转变。加热转变终了温度是 Ac_3 点。此时的晶体结构称为面心立方晶

㊀ 为区别加热及冷却时的相变，在加热相变点附加 c，冷却相变点附加 r 表示，分别取自法语的加热（chauffage）和冷却（refroidissemen）的首字母。

格（FCC，Face Centered Cubic）。从显微组织上来看是碳化物固溶于奥氏体的状态。

接着从该状态冷却时，自800℃起缓冷（冷却速度小于或等于15℃/h），会在 Ar_1 点发生由奥氏体向铁素体的转变。此时碳被释放出来成为碳化物析出，再次返回到初始的铁素体中分散着碳化物的球化退火组织状态。

另外，若进行快速冷却（如水冷）的话，则会转变成叫做马氏体的极硬组织，即淬火组织。这是由于合金元素没有足够的时间像缓冷那样进行移动（扩散），尤其是来不及释放出碳化物，而是到了低温区产生瞬时的晶体结构变化。这一过程就是马氏体转变。

这时的马氏体晶体结构属于体心正方晶格（BCT，Body Centered Tetragonal），与原来的体心立方晶格相比，在某一方向上有所伸长。这是因为某一方向上的铁原子间隙被碳原子占据而造成微观变形所致，同时也是产生硬化现象的原因。

这种晶体结构的变化被称为相变（Phase Transformation）。通过铁与碳原子的排列变化，会使微观组织发生变化，从而导致强度和韧性等力学性能及热膨胀系数、热导率等物理性能也随之变化。因此，热处理可定义为“利用对特殊钢加热和冷却及改变冷却速度所产生的晶体结构变化，即相变来得到所需微观组织和性能的过程。”

5.2　热处理的基础知识

热处理是通过相变进行的，各种热处理温度可用图5-3所示的铁碳相图来表示。所谓相图，是指某种组成（这里指铁和碳）的合金在极为缓慢的加热和冷却过程中所呈现的相变状态。碳的质量分数为0.85%的钢（JIS碳素工具钢中的SK85最为接近）的 A_1 线是723℃，含碳量在此之下时，α相（铁素体）和γ相（奥氏体）共存，含碳量在此之上时，α相（铁素体）和 Fe_3C（碳化物）共存。碳化物完全固溶的温度是 A_{cm}。下面就不同类型的热处理进行说明。

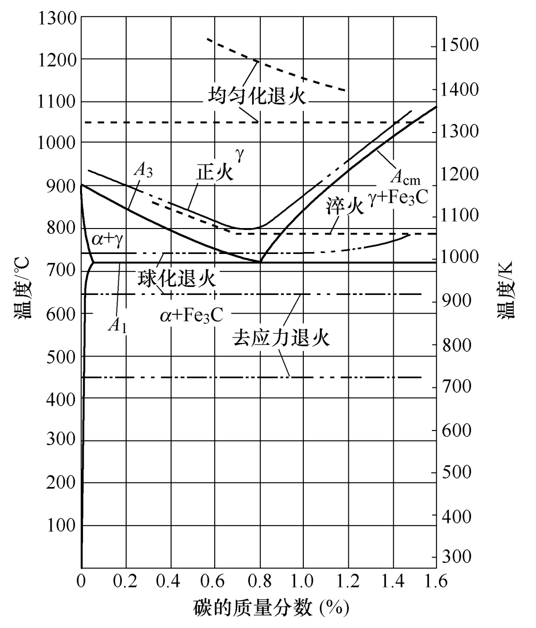


图 5-3　铁碳相图与热处理温度

5.2.1　正火（Normalizing）

正火是将工件加热到高于 A_3 点或 A_{cm}点以上 30 ~ 50℃的完全奥氏体区域后，再进行冷却的热处理工艺。其目的是改善锻造等热加工引起的晶粒粗大和不均匀性，消除晶界析出的网状碳化物，或作为球化退火的预处理等。

5.2.2　退火（Annealing）

退火按热处理目的和方法不同，分为均匀化退火、完全退火、等温退火、球化退火、去应力退火。

均匀化退火（Soaking）是把工件加热到奥氏体区域的 1050 ~ 1200℃温度下长时间保温的方法，主要是为了消除钢锭带状偏析和碳化物偏析等，在高温下长时间保温并靠扩散来实现化学成分的均匀

化。由于在高温下长时间保温会造成晶粒粗大，所以多在锻造前加热时进行均匀化退火。

完全退火主要用于低合金钢的热处理，是将工件加热到完全奥氏体区域后，缓冷至 Ar_1 转变终了点附近约650℃附近的方法。

等温退火与完全退火的加热过程相同，是针对淬透性较好的合金钢所用的短时间处理方法。加热至奥氏体化温度后，通过在600℃左右的温度下保温使铁素体及珠光体转变，从而达到缩短处理时间的目的。

去应力退火是在低于 A_1 点的温度到450℃之间进行保温的方法，常用来降低硬度及消除焊接应力等。

球化退火是通过使分散在铁素体中的碳化物球化来达到最为软化状态的退火方法。模具钢所指的退火一般是这种球化退火，目的在于降低硬度，提高可加工性，调整淬火前的组织等。对于模具来说，淬火时需要让球状碳化物弥散，溶于马氏体基体中来提高耐磨性，所以也需要淬火前的球状碳化物退火组织均匀分布。如果有残留层状组织和网状碳化物，会引发淬火时的淬火开裂、变形以及韧性下降。

球化退火的处理方法一般是在 A_1 转变点附近保温后，以15℃/h左右的速度进行缓冷。由于在加热过程中 Mn、Cr、Mo 等碳化物形成元素固溶于渗碳体中，所以基体中这些元素的含量较低，因而基体本身较软且富有延展性。

图5-4所示为具有代表性的球化退火方法。图5-4a所示为缓冷法，是在 Ac_1 线和 A_{cm} 或 Ac_3 线的中间温度保温后，进行缓冷的方法。在此温度区域进行加热的过程中，碳化物并未完全固溶而是适当残留。在随后的冷却过程中，固溶的碳及其他合金元素以残留碳化物为核心扩散聚集，成长为球状碳化物。

图5-4b所示为等温转变法，两相区的加热过程与缓冷法相同，不过后续冷却是通过在珠光体转变区域（碳化物析出区域）进行等温保温来促进碳化物析出的，接着又通过缓冷来助其成长。

图5-4c所示为反复加热冷却法，用于碳化物的快速球化。图5-4d所示为低温法，适用于冷作钢及淬火钢。另外，当淬透性好的

钢仅靠缓冷软化不足时，可将低温法作为追加处理使用。

主要工模具钢的球化退火条件和退火硬度已经在第 4 章的表 4-9 中介绍。

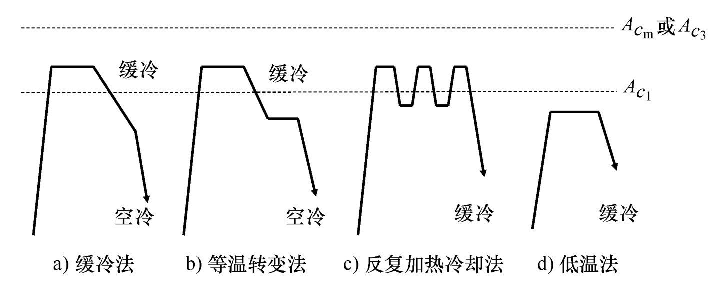


图 5-4　球化退火方法

5.2.3　淬火（Quenching or Hardening）

1. 马氏体转变

所谓淬火是指把钢加热到奥氏体化后，以不发生不完全淬火组织的冷却速度（大于临界冷却速度）快速冷却使其进行马氏体转变的热处理工艺。马氏体转变开始温度（*Ms*）和马氏体转变终了温度（*Mf*）取决于钢的化学成分，尤其是含碳量。此含碳量是淬火前奥氏体中固溶的碳的含量。含碳量和 Mn、Cr、Ni 等合金元素越多，*Ms* 值越低。*Ms* 值与合金元素的关系一般表示为

$$Ms(℃) = 550 - 350 \times w(\mathrm{C}) - 40 \times w(\mathrm{Mn}) - 35 \times w(\mathrm{V}) - 20 \times w(\mathrm{Cr}) - 17 \times w(\mathrm{Ni}) - 10 \times w(\mathrm{Cu}) - 10 \times w(\mathrm{Mo}) - 5 \times w(w) + 15 \times w(\mathrm{Co}) + 30 \times w(\mathrm{Al})$$

对于在奥氏体状态没有残留碳化物的亚共析钢来说，可以直接将成分代入此式计算 *Ms* 值。而对于有未溶的残留碳化物的过共析钢来说，则需将剔除碳化物部分后的奥氏体的成分代入计算。

马氏体的结晶结构如图 5-2 所示。马氏体转变在瞬间完成，不是靠碳和合金元素的扩散形成，而是沿一定结晶面的晶格移动及双晶变形所致，即是位错运动的结果。马氏体的晶体结构为体心正方晶格，

原体心立方晶格的 C 轴方向被碳原子占据，由此形成微观畸变而产生硬化效果。

因此，随着含碳量的增加，淬火硬度会上升。不过，根据图 3－2 所示的含碳量与淬火硬度的关系，在 w(C) <0.6% 时，硬度会随着含碳量的升高上升到 65HRC；但超过该质量分数后，即使增加含碳量，硬度也不再升高。

马氏体转变时有这样的特点：在铁素体的体心立方晶格的某一方向出现伸长，膨胀成体心正方晶格。所以，实际淬火时要注意，会出现比退火状态膨胀的现象。

2. 残留奥氏体

像工模具钢之类的高碳钢，即使淬火也不会完全转变为马氏体。因为马氏体转变终了温度 *Mf* 线多在常温之下，所以淬火状态的奥氏体会残留下来，称为残留奥氏体（Retained Austenite）。C 及 Ni、Mn、Cr 等合金元素的含量越高，残留奥氏体的量越多。另外，奥氏体化温度越高及淬火冷却速度越慢，残留奥氏体的量也会越多。

钢种不同，奥氏体的残留量及回火分解过程也不同。当淬火温度适宜时，SKS3 系钢、SKD11 钢及 SKH51 钢的残留奥氏体量分别为 15%（体积分数）、20%～25%（体积分数）及 25%～30%（体积分数）。低合金工具钢的残留奥氏体分解温度较低，而高合金工具钢在 500℃以上才发生分解。自古以来，对残留奥氏体的功过论说不一，当其含量增多时，会有降低硬度和弹性极限的问题，不过也有提高韧性的作用。

3. 淬火温度与保温时间

前面介绍了淬火时奥氏体的组成十分重要。接下来介绍一下与其相关的淬火温度和保温时间的影响。首先，各种工模具钢的适宜淬火温度范围有所不同，如同第 4 章的图 4-7 及表 4-7 所示。

奥氏体的组成取决于退火状态下碳化物向奥氏体中固溶的程度，即温度和时间的组合。这一关系与后述的回火参数同样，一般来说可用下式[2]表示。其中的常数因钢种而异，温度的影响较大，时间呈对数关系。

$$P = T\ (\boldsymbol{C} + \lg t) \times 10^{-3}$$

式中 T——奥氏体化温度（热力学温度）；

t——保温时间；

C——取决于含碳量的常数。

淬火温度升高或奥氏体化时间延长，都会促进碳化物固溶而使含碳量增加，硬度也随之升高。另一方面，硬度又会因残留奥氏体的增加而降低。

冷作模具钢 SKD11 在 1030℃ 的奥氏体化保温时间和硬度的关系如图 5-5[1] 所示。在 10min 时硬度出现最高值，其后随残留奥氏体量的增加硬度反而下降。SKD11 钢的适宜保温时间是 20～40min。

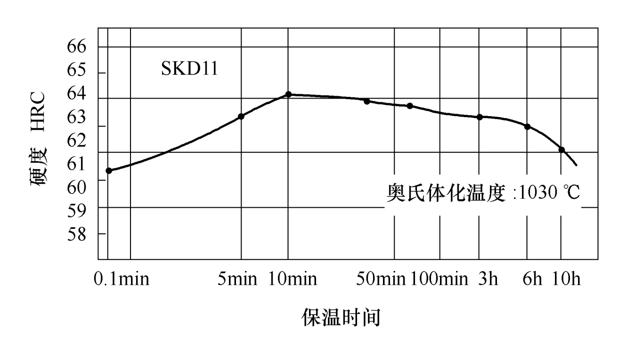


图 5-5　奥氏体化保温时间和硬度的关系

通常所说的“保温时间为 30min/厚度 25mm”是指炉温达到设定温度后，直至模具心部升至相同温度的时间。实质上，关键是要考虑模具材料均匀达到淬火温度之后的保温时间。

图 5-6 所示为淬火时的显微组织变化。由于退火状态的组织中分布的碳化物固溶于基体之中，所以碳化物含量降低（剩余碳化物称为未溶解碳化物），而基体中的碳和合金元素的含量增加。图 5-7 所示为 SKD11 钢的基体组成与淬火温度的关系[3]。随着淬火温度的上升，基体中的 C、Cr、Mo 等含量也上升。主要模具用钢的基体组成见表 3－1。

4. 淬透性

加热（奥氏体化或达到淬火温度）后进行淬火时，冷却也极为

重要。常言道“淬火就是快冷”，这是针对钢种的淬透性，用不出现铁素体、珠光体和贝氏体等马氏体以外的不完全淬火组织的冷却速度衡量。钢种不同，所需冷却速度也不同。碳素工模具钢要用水冷，低合金工模具钢要用油冷，而一些冷作模具钢及热作模具钢采用空冷即可达到淬火状态。

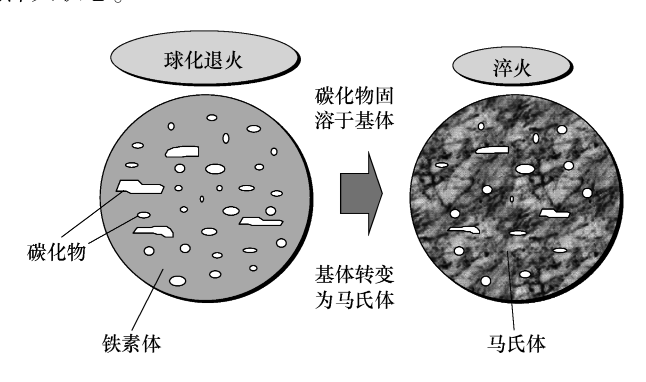


图 5-6　淬火时的显微组织变化

表示淬透性的是连续冷却转变图。第 4 章图 4-8 已经展示了几种钢的连续冷却转变图。在此，将几种具有代表性的工模具钢的连续冷却转变图的相变区域汇总在一起，如图 5-8 所示。由于实际的淬火并非等速冷却，所以不会与此连续冷却转变图完全吻合。不过，如果知道模具的实际冷却速度，可以预测其相变行为。

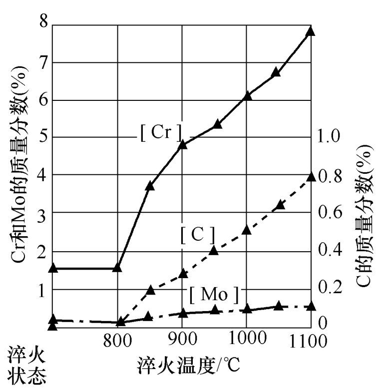


图 5-7　SKD11 的基体组成与淬火温度的关系

5. 淬火方式

当实际进行模具热处理时，淬火过程并不只是单一的方式，而往往采用不同方式的组合。其目的是既要快速冷却又要防止开裂。较大

的模具快冷时，会因模具表面和内部存在温差而产生热应力，还会因相变的不同时而产生相变应力。这两种应力相叠加形成的拉应力，易使尖角形状的部位发生开裂。

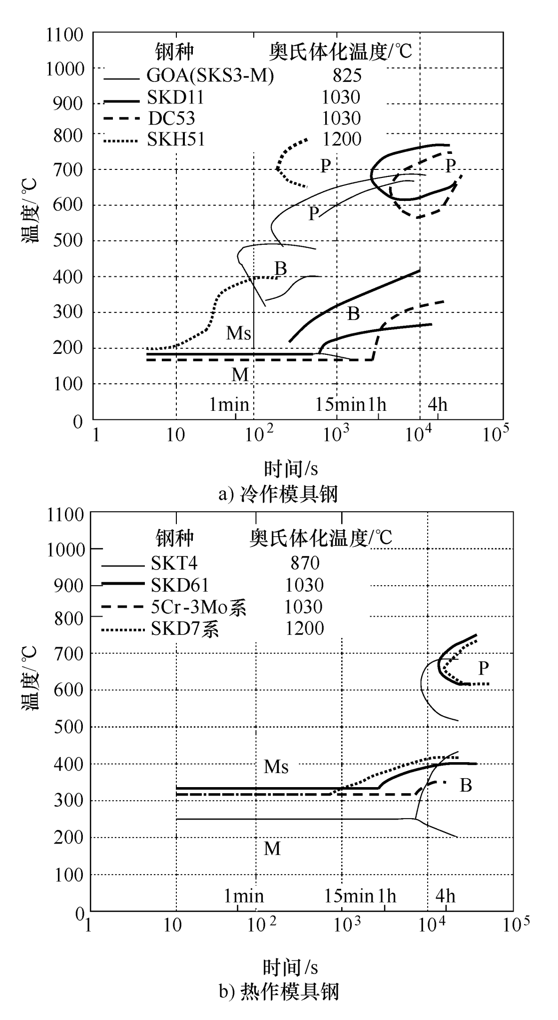


图 5-8　连续冷却转变图

图 5-9 所示为限时淬火和分级淬火。所谓限时淬火（Time

Quenching）是从奥氏体状态冷却时，为了不进入珠光体转变区而快冷（比如油冷）之后，在马氏体转变开始点以上取出，令其在 *Ms* 点以下的易淬裂区域进行空冷的方法。尽量使模具内外的温度达到均匀的情况下进行转变，以防止开裂。

分级淬火（Marquenching）是从奥氏体化状态快冷后，在等温转变图的稳定区域保温，将工件内外温差降至比限时淬火还小，然后再次快冷至马氏体转变区域的方法。这种方法既可抑制模具变形，又可使马氏体转变平稳进行，适用于形状不均匀、厚度差较大的模具的热处理。中间保温一般用盐浴，最近随着真空炉温度控制技术的进步，有时也利用真空炉进行。

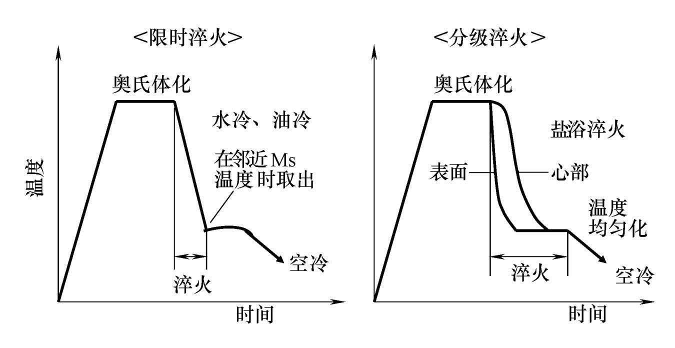


图 5-9　限时淬火和分级淬火

6. 深冷处理

前面已谈到，淬火转变时，除了马氏体以外还会残留未转变的奥氏体。残留奥氏体质地较软，含量过多时则影响淬火硬度。另外，残留奥氏体的组织结构不稳定，即使在常温也会发生缓慢转变，从而引起尺寸变化。因此，对要求精度为微米级的模具和零部件，需使残留奥氏体完全分解或令其稳定化。不过，适量的残留奥氏体也有提高韧性的作用。

使残留奥氏体发生分解的方法有两种，一种是高温回火，另一种是深冷处理。有些钢种在高温回火后硬度过低，因而需采用深冷处理。深冷处理（Sub-Zero）是将工件淬火后再冷却到 0℃ 以下进一步

分解残留奥氏体的方法。例如，用酒精和干冰可达 -76℃的冷却气氛，用液氮可达 -196℃的冷却气氛。通常淬火后如直接放入冷却槽，则容易出现开裂，所以应在 100℃左右（热水槽）进行假性回火之后再放入冷处理槽中。在此过程完成之后进行常规回火即可。

5.2.4 回火（Tempering）

1. 回火的作用和过程

所谓回火，是将淬火钢在 Ac_1 线以下的温度进行加热，让碳化物析出从而恢复韧性，并使残留奥氏体分解转变成稳定组织的热处理工艺。虽然材料淬火后可得到高硬度的马氏体组织，但因为脆性大，在生产实际中不能直接用作模具材料。因此需要通过回火来把材料组织调整到强度和韧性均衡的状态。有时利用二次硬化甚至会使材料达到高于淬火状态的硬度。由于材料的各种特性随回火温度而变化，所以为得到所需特性，回火温度的选择显得十分重要。

图 5-10 所示为从长度变化的角度来表示马氏体组织随回火温度发生的变化。与退火相比，虽然淬火后体积出现了膨胀，但在随后的加热过程中又会出现收缩、膨胀、收缩的变化，这就是回火的第Ⅰ～第Ⅲ阶段。图 5-10 中所示为碳素工具钢的变化过程[4]。

首先，淬火状态的碳原子处于过饱和固溶状态，在进行 200℃低温回火后，会成为不稳定的过渡碳化物，即 ε 碳化物（$Fe_{2-2.4}C$），从基体析出，使基体成为低碳马氏体。因此随着屈服强度的上升，韧性也稍有回复。这是第Ⅰ阶段。

其后，淬火状态的残留奥氏体分解成马氏体和贝氏体，这是第Ⅱ阶段。对于低合金钢来说，在 200℃左右回火时，有时第Ⅰ阶段和第Ⅱ阶段会同时发生，所以需要对此时转变的马氏体再次进行回火。

进一步提高回火温度，马氏体 + ε 碳化物转变成铁素体 + 渗碳体（Fe_3C 系碳化物），并逐步球化长大，致使强度和硬度也逐渐随之降低，这就是第Ⅲ阶段。

上述是指碳素工具钢的情况，但对于含 Cr、Mo、W、V 等合金

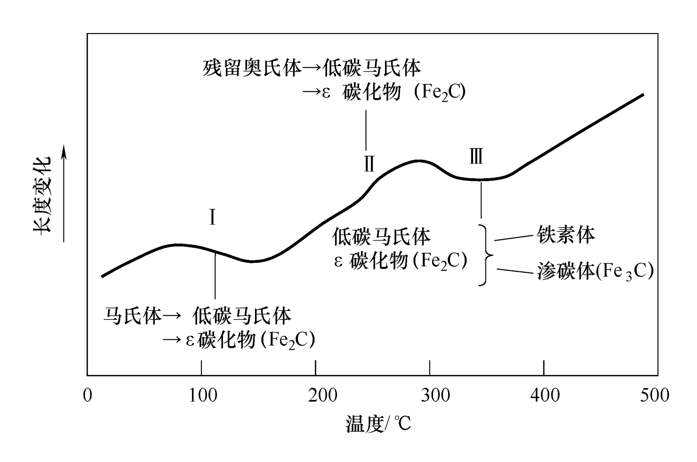


图 5-10 回火与长度变化

元素的合金钢（如冷作模具钢、热作模具钢及高速工具钢等）来说，各回火阶段均向高温侧移动，并在 500℃左右析出渗碳体以外的特殊碳化物，导致晶格畸变或使位错固定，从而再次出现硬化，称为二次硬化。二次硬化所析出的微细碳化物是 V_4C_3、Mo_2C、W_2C、TiC 等，其中 V 和 Mo 的影响较大。回火温度更高时，这些碳化物变成稳定碳化物，比如有 Mo 和 V 时会变成 Mo_6C、W_6C 等，并逐渐长大。这就是回火的第Ⅳ阶段。

2. 典型钢种的回火特性

典型钢种的回火硬度曲线如图 5-11 所示。碳素工具钢淬火后虽然硬度较高，但会随回火温度的上升而软化。低合金工具钢也大致与其相同。与其不同的是冷作模具钢和热作模具钢，当在 500℃以上回火时，可以观察到两者有明显的软化滞后或二次硬化现象。高速工具钢的二次硬化效果最为显著。

冷作模具钢的回火温度与残留奥氏体量的关系及与热处理尺寸变化的关系分别如图 5-12 和图 5-13 所示。冷作模具材料的残留奥氏体分解过程，也是高合金钢偏向高温侧发生，并伴随着这些高合金钢的残留奥氏体分解而出现硬度上升（二次硬化）。另外，从淬火状态回火时，虽然开始会慢慢收缩，但随着残留奥氏体的分解（即马氏体

转变）则表现出明显的膨胀。

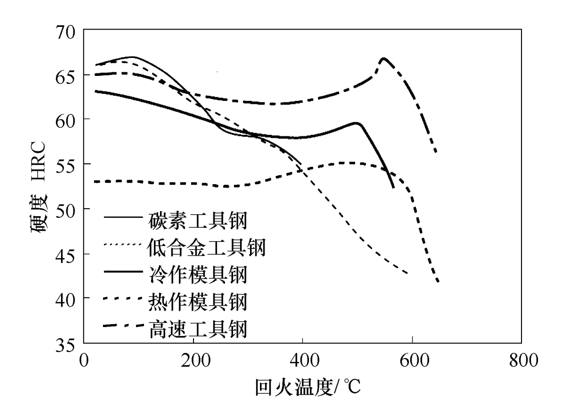


图 5-11　回火硬度曲线

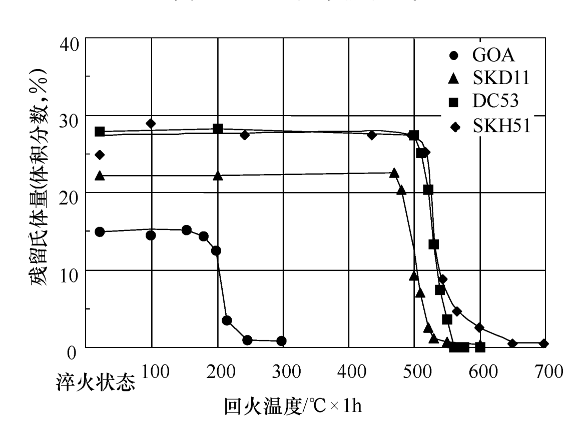


图 5-12　回火温度与残留奥氏体量

图 5-14 所示为回火温度和冲击韧度的关系。从图 5-14 可观察到随回火温度的上升，冲击韧度下降的温度区域。这是碳素工具钢和低合金工具钢中出现的称为低温回火脆性的现象，250℃左右存在冲击韧度的低谷。其原因是残留奥氏体分解和碳化物析出，所以回火时要注意避开该温度领域。此外，就 SKD11 和 DC53 之类的高合金模具钢而言，其残留奥氏体分解温度较高，致使冲击韧度的低谷也移向高温侧。

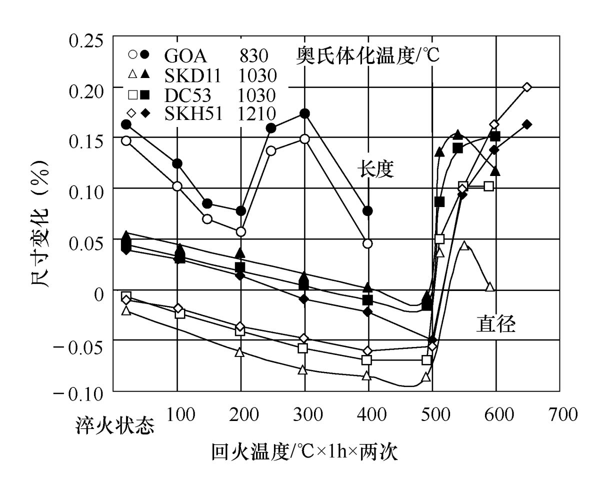


图 5-13　回火温度与热处理尺寸变化

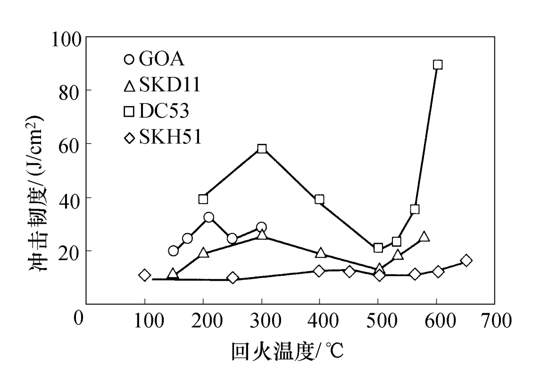


图 5-14　回火温度与冲击韧度

3. 回火参数

回火是靠热激活，即各合金元素的扩散来实现的，所以回火时的硬度和特性取决于回火温度和时间的组合。表达此关系的是回火参数[5]，表示为

$$P = T\ (C + \lg t) \times 10^{-3}$$

式中　T——回火温度（热力学温度）；

t——保温时间（h）；

C——系数，冷作模具钢为 15，热作模具钢为 20。

图 5-15 所示为主要热作模具钢的回火硬度与回火参数的关系[6]。图 5-16 所示为回火参数的诺谟图[7]。图 5-15 是在各种温度下改变保温时间来测定硬度后制作的参数值近似曲线图。回火效果取决于温度和时间的组合，可以说当参数值一定时具有同样的效果。利用诺谟图可以比较容易地选定等效回火温度和时间的组合。如图 5-16 所示，600℃ ×1h 的回火与 500℃ ×445h 的回火效果相对应。

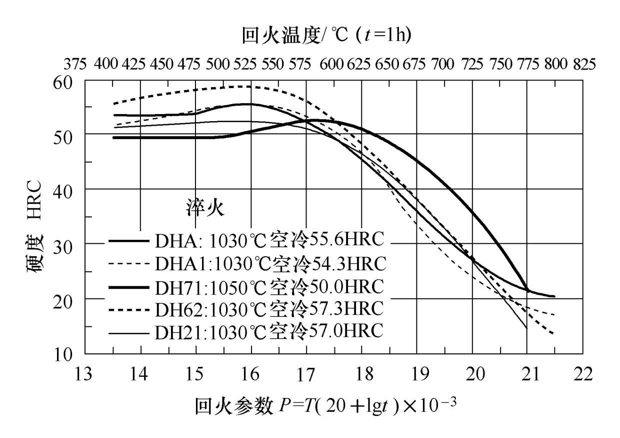


图5-15 主要热作模具钢的回火硬度与回火参数的关系

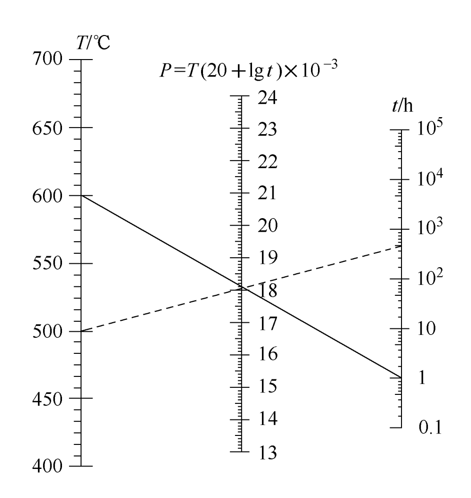


图 5-16 回火参数的诺谟图

5.2.5 固溶处理和时效硬化

淬火以外的硬化方式还有析出硬化，这已在第 4 章图 4-41 中作过说明。析出硬化即通过固溶处理得到均匀马氏体或贝氏体组织后，经时效处理析出微细碳化物来产生时效硬化。通常的析出物多是金属间化合物。在常用钢种当中，具有特殊用途的马氏体时效钢和塑料模具钢的 NAK 钢（大同品牌）等即为时效硬化钢。

5.3 实际生产中模具材料的热处理过程

前面对有关热处理基础内容作了介绍，下面将具体针对各钢种热处理的实际过程进行说明。JIS 主要钢种及特殊模具钢的热处理条件已在第 4 章作了介绍，不过只是限于标准的淬火和回火温度及淬火冷却方式而已。在实际的加热和冷却方式上，不同钢种群会有所不同。

5.3.1 碳素工具钢

碳素工具钢的淬火曲线如图 5-17 所示。就模具的加热过程来看，装炉后升温时会在表层和心部之间产生温度差，如果以此状态加热到奥氏体化温度，则会出现心部到温较晚和表面保温时间过长的问题。为此，在低于转变点温度，比如碳素工具钢约在 650℃，采取保温可缩小奥氏体化时的内外保温时间差。这一过程被称为预热。

心部温度达到奥氏体化温度后的保温时间，就碳素钢而言，10min 即可。

通常在实际操作中，一般在预先掌握不同大小的模具和装炉量时的炉温以及模具表面和心部温度的前提下，对炉温达到设定温度后的时间进行管理。

淬火方式为水冷或油冷。由于珠光体转变曲线的“鼻尖”偏向连续冷却转变图中时间短的一侧，因此为了不碰到这一转变“鼻尖”，SK 系钢采用水冷，SKS 系钢采用油冷。油冷时通常用加热到 80℃左右的淬火油。此外，为了防止淬火开裂，应在稍高于马氏体转

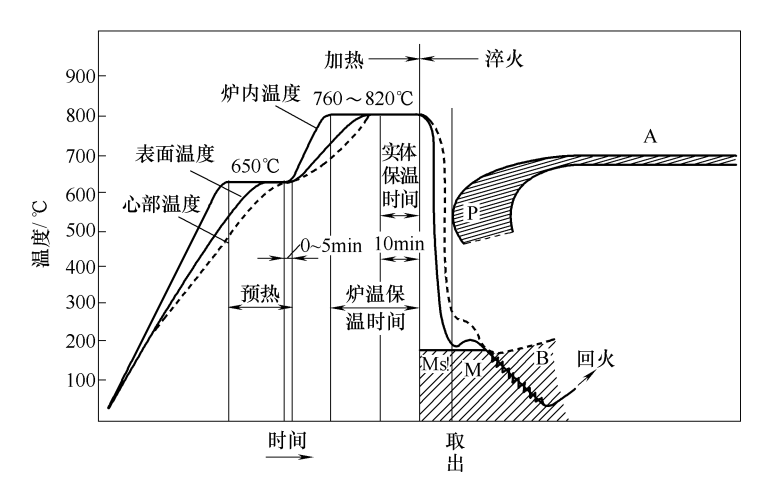


图 5-17　碳素工具钢的淬火曲线

变温度取出空冷。取出冷却后，待模具表面温度降到 50～60℃后立即放到回火炉中回火。这是因为如果在淬火马氏体状态下放置于室温的话，容易发生淬火开裂。

碳素工具钢的回火曲线如图 5-18 所示。回火温度是 150～200℃，通常在 180℃进行两次。模具心部温度达到炉温后，保温 1h 即可。回火时也同样需要预先掌握不同尺寸模具和装炉量的内部升温滞后程度，要在计入此部分的前提下来管理回火加热后的保温时间。

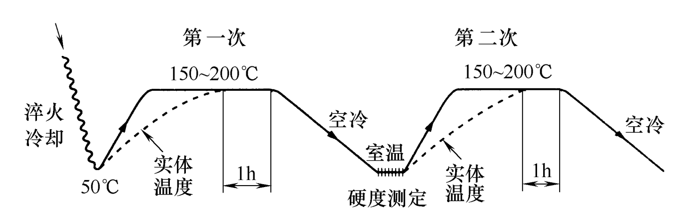


图 5-18　碳素工具钢的回火曲线

5.3.2　低合金工具钢

图 5-19 所示为 JIS SKS 系等低合金工具钢的淬火曲线，基本上与

碳素工具钢相同。预热通常在650℃进行，内外温差消失后保温5min即可。随后注意要尽量快速加热到各钢种相应的淬火温度（奥氏体化温度）来极力减少氧化和脱碳。

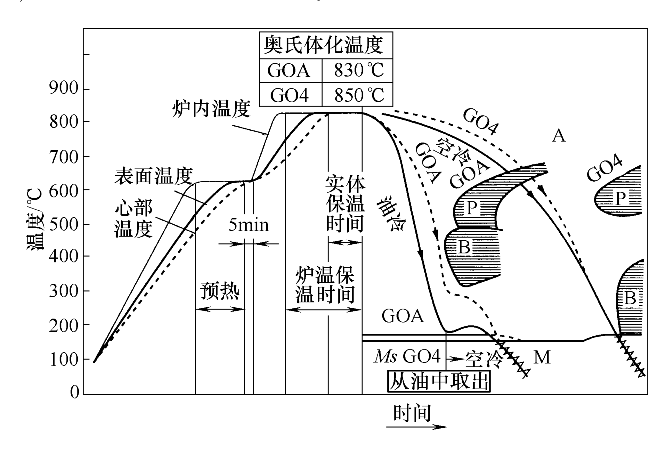


图5-19　低合金工具钢的淬火曲线

低合金工具钢的适宜淬火温度区域较窄，所以在炉温的设定和管理上要严加注意。通常淬火温度过低会造成碳化物固溶量减少而降低淬透性，即产生不完全淬火组织。另一方面，淬火温度过高则会增加残留奥氏体量，导致硬度下降。

虽说低合金工具钢的淬透性比碳素钢要好一些，但珠光体和贝氏体转变“鼻尖”仍偏向于连续冷却转变图中时间较短的一侧，所以冷却方式基本上用油冷。从炉中取出模具后浸入60～80℃的油中并加以搅拌或喷流进行冷却。避开珠光体和贝氏体的转变“鼻尖”冷却下来后，如放入油中冷到底则会有开裂危险，所以应在稍高于 *Ms* 线之上取出空冷。冷却到50℃左右放入回火炉的过程与碳素钢相同。另外，GO4钢（大同品牌）的珠光体和贝氏体的转变“鼻尖”仍偏向连续冷却转变图中时间长的一侧，所以空冷也可实现淬火。

如果是容易发生淬火开裂的形状，可利用前述分级淬火法。用分级淬火油在稍高于 *Ms* 线约200℃淬火后，保温几分钟即取出冷却，以防止淬火开裂。

低合金工具钢的回火曲线如图 5-20 所示。为确保回火硬度达 60HRC 以上，并避开韧性低谷区域而在 150～200℃ 回火。模具温度均匀后保温 1h 即可。如果回火过程完善，全部达到回火马氏体且硬度也符合设定范围的话，回火只进行一次也没问题。不过，依温度不同，马氏体也有残留的可能，所以为了不让硬度下降，在比第一次回火温度低 10℃ 的温度进行第二次回火。如果第一次回火后硬度偏高，也可利用第二次回火来调整。

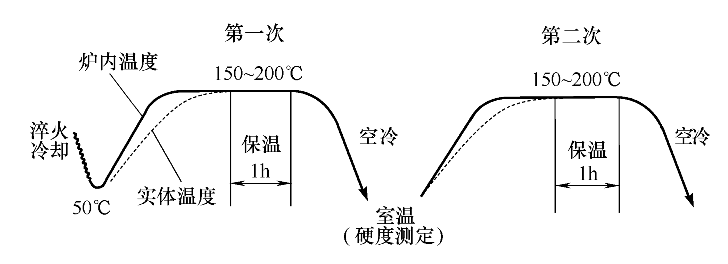


图 5-20　低合金工具钢的回火曲线

5.3.3　高合金工具钢

1. 冷作模具钢

冷作模具钢 SKD11 和 DC53 等的淬火曲线如图 5-21 所示。通常在比转变点稍低的 800℃ 下预热，使模具内外温度达到均匀。如果存在加热变形问题，可在更低的 600℃ 左右先进行第一次预热。淬火温度为 1030℃，模具心部达到此温度后保温 20～40min 即可。

冷作模具钢含铬量高，故淬透性较好，冷却方式为空冷或真空炉气冷。空冷时为减少变形应进行均匀冷却，要避免单方向风冷，例如吊挂起来时应不断改变方向等。对大型模具进行冷却时，可将其置于转台之上等，更要注意冷却的均匀性。

对形状复杂或大型模具，为防止冷却中产生氧化，也可采取在 500℃ 左右的盐浴中进行分级淬火，或者油冷到 500℃ 后取出空冷等方式。

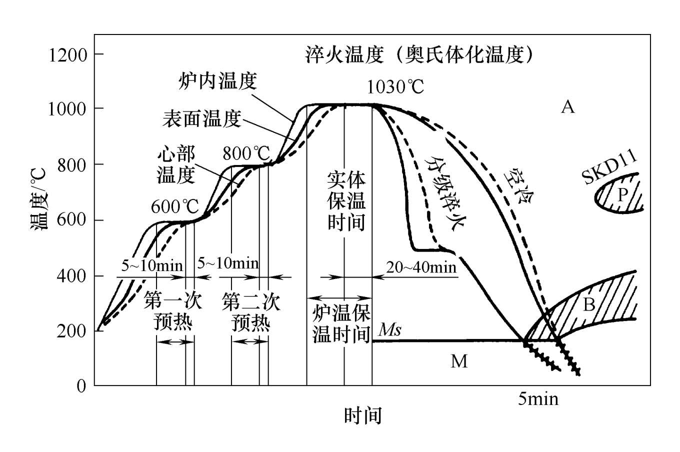
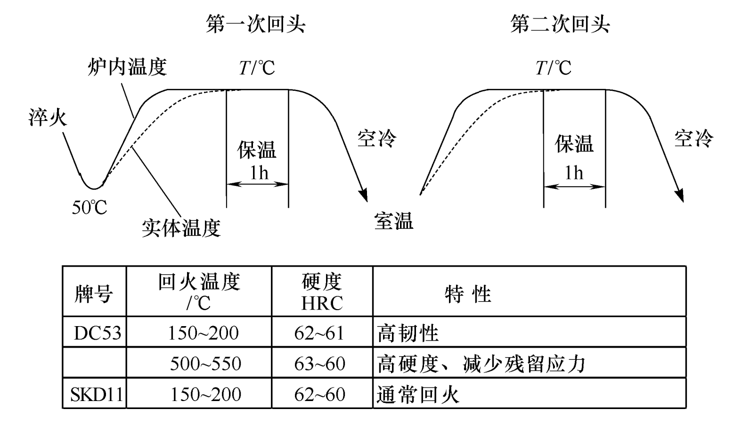


图 5-21 冷作模具钢的淬火曲线

高合金冷作模具钢的回火曲线如图 5-22 所示。通常 SKD11 钢在既可保持 60～61HRC 的高硬度，又处于韧性上升区域的 180℃左右进行低温回火。与此相比，本书第 4 章谈到的 8Cr 系模具钢中的 DC53，即使同样进行低温回火，在同等硬度条件下，韧性要高出许多，所以也可用于低温回火。当要求其硬度达到比 SKD11 钢高的 62～63HRC，并要求高韧性时，推荐进行高温回火。不过，残留奥氏体的分解温度



牌号	回火温度 /℃	硬度 HRC	特 性
DC53	150~200	62~61	高韧性
	500~550	63~60	高硬度、减少残留应力
SKD11	150~200	62~60	通常回火

图 5-22 高合金冷作模具钢的回火曲线

为500℃左右，在此温度区域会出现韧性低谷，所以最好在超越此韧性低谷出现韧性回复的520～540℃进行回火为宜。对高合金冷作模具钢来说，高温回火会导致残留奥氏体分解转变成马氏体，为使此马氏体得到回火，必须进行第二次回火。

2. 热作模具钢

SKD61等热作模具钢的淬火方法也与冷作模具钢相同，冷却时也因淬透性较好而基本采用空冷。不过，压铸模之类的大型模具，单采用空冷会发生贝氏体转变，因此采用了各种予以避开的冷却方法。正如在第4章压铸模部分所提到的那样，发生贝氏体转变的回火组织韧性下降[8,10]。还有，当在上部温度区域冷却缓慢时，沿原奥氏体晶界析出的碳化物虽然对韧性影响不大，但也是导致韧性下降的原因之一。为确保韧性良好，最好采用快冷，可是同时存在变形较大的问题。为此，既能确保韧性又可抑制变形的各种淬火方法纷纷得到了开发和应用。

早前北美压铸协会推荐的真空淬火曲线如图5-23所示[11]。这种真空淬火方式也是其中的一种方法。这是一种分级淬火类型的热处理方式，也称作等温淬火，是将模具冷却后在480℃左右保温，待内外温差缩小后再次快冷的方式。根据有关数据，可确保韧性的下部温度区域的冷却速度约为5℃/min。

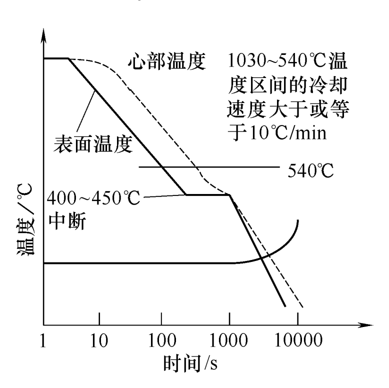


图5-23　北美压铸协会推荐的真空淬火曲线

热作模具钢的使用硬度是40～50HRC，基本上需要高温回火，并根据使用硬度来设定回火温度，最少要反复进行两次。第二次回火的目的是对残留奥氏体转变而成的马氏体进行回火。

5.3.4 高速工具钢

高速工具钢的淬火曲线如图5-24所示，可以看出，高速工具钢的淬火温度明显高于其他模具用钢，需要快速均匀加热并防止渗碳和脱碳。因此长期以来，利用氯化钡（$BaCl_2$）等盐浴来进行加热淬火。

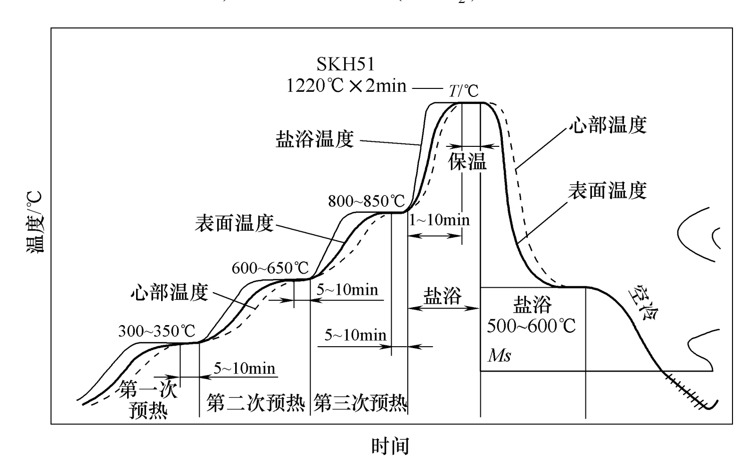


图5-24 高速工具钢的淬火曲线

高速工具钢的预热通常分600～650℃和800～850℃两步进行，为抑制热变形有时还会在300℃增加一次预热。预热时间是内外温差达到均匀后5～10min即可。由于淬火温度较高，所以保温时间较短。就SKH51钢来说，淬火温度是1220℃，模具内外温度差消失后的保温时间是2min。

淬火采用分级淬火法。将模具浸入500～600℃的盐浴中保温，待内外温差消失后进行空冷。其目的是防止开裂和减少热处理变形。有时也会在稍高于*Ms*线取出进行空冷。在对模具进行热处理时，因其质量远大于一般工具，所需加热时间较长，并且在盐浴中浸泡的时

间也较长，致使脱碳危险性增加。要防止脱碳，需注意避免水分、氧化皮和异种盐的混入。另外，为防止自然劣化，还需要添加脱碳防止剂。

高速工具钢的回火曲线如图 5-25 所示。需在高于二次硬化的温度进行两次以上的回火。就 SKH51 钢来说回火温度是 570～610℃，保温时间与温度的关系按前述回火参数决定。

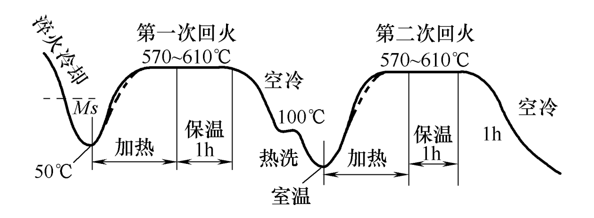


图 5-25　高速工具钢的回火曲线

用于制造模具的高速工具钢除了 SKH51 钢之外还有基体钢，但与 SKH51 钢相比其合金元素含量较低，因此淬火温度也要低一些。所以通常基体钢的淬火温度和回火温度低于一般高速工具钢，1100～1150℃是其较适宜的淬火温度[12]。

近年来，利用真空炉的真空淬火也有所增加。

5.4　热处理的常见问题与解决措施

对模具进行热处理时，难免会出现一些问题。在从加热到淬火和回火的过程中，不确定会遇到什么问题，因此要注意对可能出现的问题进行预测并准备好解决措施，以便出现问题时将其影响降到最低程度。

热处理常见问题的原因如图 5-26 所示。从现象来看，热处理问题可大致分为淬火开裂、硬度不良、尺寸变形三大类。其中淬火开裂最难以补救，往往需要重新开模，所以要特别注意。下面将分别对各种问题加以说明。

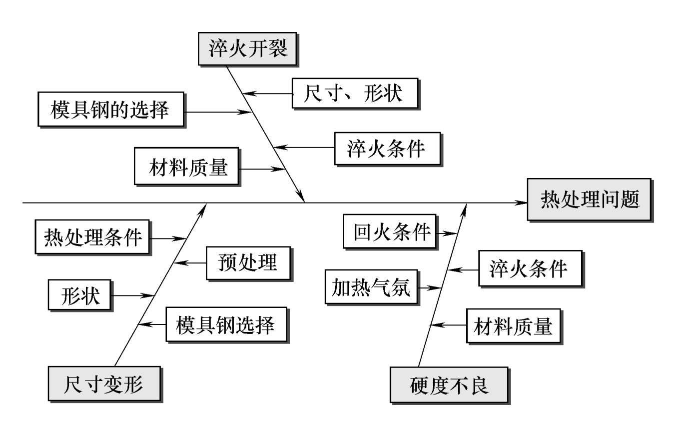


图 5-26　热处理常见问题的原因

5.4.1　淬火开裂

图 5-27 更加详细地表示了淬火开裂的发生原因。其中最主要的是快冷造成的模具内外温差所引起的热应力，以及因马氏体转变速度不同导致模具表面产生相变应力（拉应力），当该拉应力发生时，会叠加其他因素而造成开裂。

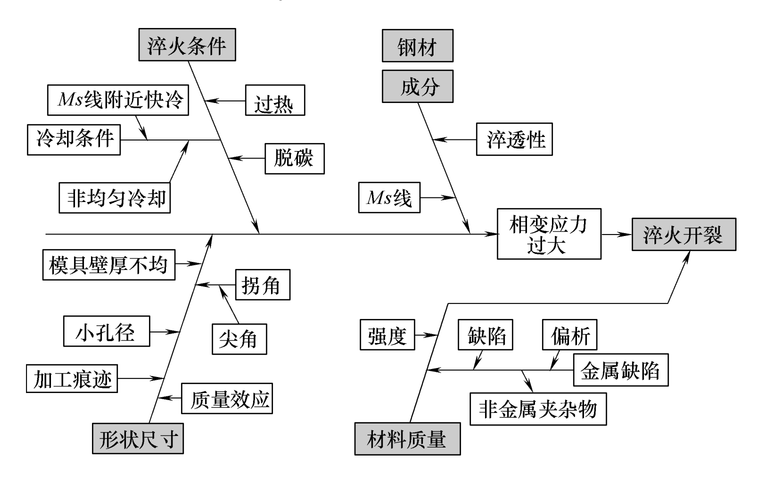


图 5-27　淬火开裂的原因

虽然也有因材料缺陷及钢种选用失误而造成开裂的情况，但以加工形状和淬火条件引起的开裂最为多见。尤其是残留的电火花加工变质层和机加工痕迹最容易成为开裂起点。此外，还有尖角起裂、较大壁厚差引起的拉应力增大等原因。

从淬火条件来看，加热气氛也比较重要。真空淬火时没问题，但用气氛加热时一旦发生脱碳和渗碳，就会因碳含量的变化而使表面和内部的相变点出现不同，即转变速度不同。特别是出现脱碳时会增加表面拉应力。另外，淬火温度过高或保温时间过长都会造成晶粒粗大，致使马氏体组织也粗大，从而增大开裂的可能性。*Ms* 线附近的快冷或冷却到较低温度的过度冷却也会成为开裂的原因。

淬火开裂的解决措施，主要是尽量减少尖角、提高表面加工精度、选用合适的加热条件及淬火条件等。

5.4.2　硬度不足

淬火后整体硬度不足大多是由于淬火条件引起的。比如淬火温度过低会形成铁素体＋奥氏体的淬火组织，而淬火温度过高则又使残留奥氏体增加。再有，冷却速度过慢会发生珠光体和贝氏体转变，形成不完全淬火组织。加热气氛如果是脱碳气氛，则表面含碳量下降会使硬度降低。

另外，回火温度设定过高或保温时间过长同样会使硬度下降。

5.4.3　尺寸变形

热处理时的尺寸变化来自晶体结构和组织的变化，就钢材来说是必然发生的现象。形状的变化及弯曲、翘曲等称为变形。

从热处理前的材料加工状态来看，如果冷作加工和切削加工时残留加工应力，在随后的热处理时，会因这些残留应力得到释放消除而发生变形。从热处理方面的因素来看，常见的有装炉方式及放置方法不妥造成的自重弯曲、加热和冷却不均匀等。壁厚差较大时也会发生变形。

冷却时，冷却速度越大或淬火温度越高，越会加大模具内外温

差，从而增加变形的可能性。

变形的防止方法有：在淬火前消除机械加工的残留应力，注意装炉方式，尽量缓慢加热，冷却时采用分级淬火使内外温差缩小后再进行淬火等方法。

5.4.4 其他

用气氛炉加热时，如不控制好气氛，会在模具表面发生脱碳。氧化是工件在氧化型气氛中加热时与氧气反应而产生的结果。氧化持续发展则形成氧化皮。

表面的氧化速度如果比内部碳的扩散速度快，则生成氧化皮；反之，碳的扩散速度比氧化速度快时则发生脱碳。氧化皮从表面起按 Fe_2O_3、Fe_3O_4、F_eO 的顺序形成含氧量较高的氧化物。

如带着氧化皮进行淬火，会产生硬度不匀、硬度不良及淬火开裂等，需予以注意。为防止产生氧化皮，除了控制好加热气氛外，还有真空化及采用还原性气氛或中性气氛等方法。

5.5 表面硬化处理和表面改性

有时为增强模具的耐磨性和耐蚀性等，需进行各种表面硬化处理和表面镀膜等。工模具钢经淬火和回火后的硬度虽可高达 1000HV，但这一硬度仍有不能满足耐磨要求的情况。

表面硬化处理方法的分类见表 5-1。从广义而言，表面镀膜和表面改性也包括在内。在表 5-1 当中，表面组成不变的处理是指利用淬火马氏体转变以及进行机械压缩等方法，而表面组成变化的处理一般是指含碳量的增加和扩散的渗碳处理、含氮量增加的氮化处理等。此外，扩散处理是指靠各种金属原子扩散来达到一定目的的处理，其中的盐浴浸泡处理是指被称作“TD 处理”的表面处理技术[13]。

形成表面镀膜的处理中常见的有热喷涂、电沉积、化学处理、堆焊等。其中的 PVD（物理沉积）和 CVD（化学沉积）最为常用。

这些表面硬化处理方法当中，适用于模具处理的还很有限，通常

以模具的大小、处理温度及成本来判断是否适用。下面来看一下实际用于模具的表面处理方法。

表 5-1　表面硬化处理方法的分类

分类		名称	
表面组成不变	表面硬化	感应淬火	
		火焰淬火	
		高密度能量淬火	激光、电子束
	机械处理	喷丸	喷丸、表面改性 WPC（Wide Peening and Cleaning）
		塑性加工	压轧成形
表面组成变化	渗入型硬化	渗碳法	固体、气体、真空、等离子渗碳
		氮化	盐浴、气体、等离子、氧氮化
		软氮化	气体、渗硫、渗硫氮化、等离子
		渗硼法	渗硼法
		离子注入法	
	扩散处理	渗硅、渗铝、渗铬	
		蒸汽处理	
		盐浴	TD 处理
镀膜	热喷涂	火焰、电弧、等离子	耐磨耐蚀合金
	堆焊	焊接	斯特莱特硬质合金
	电沉积	电镀	镀硬铬
	化学处理	镀层	
	气相沉积	PVD（物理气相沉积）	溅射、离子镀、真空镀
		CVD（化学气相沉积）	

5.5.1　氮化

氮化处理在 A_1 转变温度以下进行。由于氮化可在回火温度以下进行，不用出现变形，所以适用于多种模具。氮化方法通常有气体氮

化法、盐浴氮化法（Tufftride 处理最为常用）、气体软氮化、等离子氮化处理等。氮化法的种类和特点见表 5-2。应用在模具上的通常是碳氮共渗并称为软氮化的后三种方法。

表 5-2　氮化法的种类和特点

种类 / 项目	盐浴软氮化	气体软氮化	离子氮化	气体氮化
介质	MCN + MNCO	NH_3 + RH gas	NH_3 + 碳化氢	NH_3
温度	570℃	550 ~ 650℃	400 ~ 650℃	500 ~ 580℃
时间	3h 以内	5h 以内	100h 以内	30 ~ 50h
变形	小	小	小	小
表面	有多孔层	良好	良好	良好
生产率	中	高	低	低
成本	低	低	稍高	稍高
废弃物	盐浴（氰化物）	N_2、CO_2、H_2O 等		

这些表面处理方法所形成的表层都是 ε 相（$Fe_{2\text{-}3}N$）和 γ′相（Fe_4N）等的化合物层（厚度为 10μm），其下部是氮扩散硬化层（厚度不超过 0. 2mm）。氮化层的显微组织如图 5-28 所示。

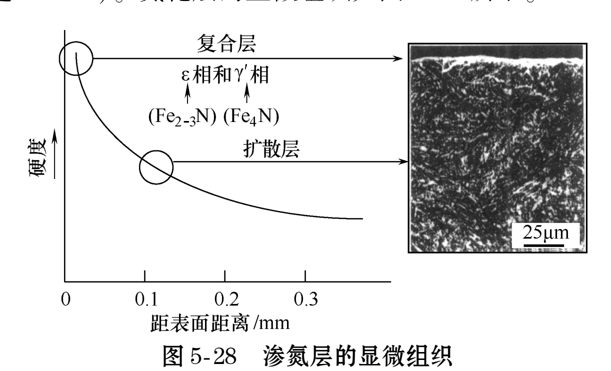


图 5-28　渗氮层的显微组织

这些氮化法被应用于铝挤压模、压铸模及塑料模。尤其是铝挤压模，通常用热作模具钢加工制成模具后采用盐浴软氮化或气体软氮化处理。其后在使用中发生磨损时，再反复氮化后继续使用。

表层形成的化合物层硬度极高，虽然耐磨效果好，但比较脆，在反复加热冷却过程中容易发生热龟裂且扩展较快，这是其难点所在。从最近有关研究结果来看，作为既保持压铸模耐热龟裂性不下降又能提高耐磨性的方法，软氮化受到了推崇。

5.5.2 扩散处理

在表 5-1 所示扩散处理当中，常用于模具的是 TD 处理[13]。该处理工艺是将模具放入约 1030℃的含钒（V）盐浴中形成碳化物镀层。盐浴中的 V 与金属中的碳（C）通过扩散相结合，在表面形成 VC 镀层，硬度可达 3000HV。在镀层与基体之间因有 C 的扩散，所以具有比其他镀层附着性好的特点。除了 V 之外，虽然也有 Nb 碳化物镀层，但 VC 层最为常用。由于 TD 处理是靠模具钢中的 C 原子扩散而硬化的方法，所以不适用于低碳钢，其处理对象是碳的质量分数下限为 0.4% C 左右的热作模具钢。

近年来，随着冷冲压成形中高强度钢板使用量的增加，拉深和冲裁模具的磨损和黏附问题越发突出，仅靠 SKD11 钢等冷作模具钢已明显不能满足要求，所以 TD 处理得到了应用，特别是与回火硬度较高的 8% Cr-2% Mo 钢相配合，在高强度钢用模具上已取得实际成果。

5.5.3 镀层

1. PVD

以形成镀膜来实现改性的方法中，具有代表性的是 PVD 和 CVD。PVD 是物理气相沉积法英文单词 Physical Vapoured Deposition 的缩写，其机理如图 5-29 和图 5-30 所示[14]。PVD 法中又有电弧离子镀法（Arc Ion Plating）和空心阴极法（Hollow Cathode），两者均是靠等离子能量来使成膜金属（蒸发源）蒸发并沉积到模具表面的方法。将蒸发源置于沉积对象外侧的是电弧离子镀法，而以蒸发源为中心将沉积对象置于外侧并使其连续回转的方法是空心阴极法。

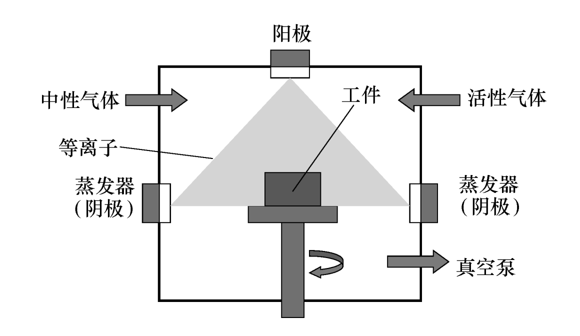


图 5-29　PVD 法的机理 （电弧离子镀法）

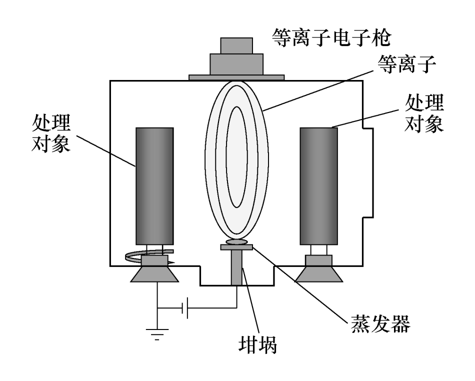


图5-30　PVD 法的机理 （空心阴极法）

2. CVD

CVD 是化学气相沉积法英文单词 Chemical Vapoured Deposition 的缩写，其机理如图 5-31 所示，成膜的反应举例见表 5-3。将模具装入炉中升温到约 1030℃后，送入气化 $TiCl_4$、甲烷、氮气和氢气形成镀层，可生成的镀层有 TiC、TiN 及 TiCN 等。

通过 PVD 和 CVD 形成且具有代表性的镀层种类见表 5-4[14]。其中，金黄色的 TiN 和银白色的 TiC 最为常用，多用于切削刀具、模具及装饰部件等。在此基础上，还可以通过形成 TiCN 和 TiAlN 等复合镀层来使其具有独特功能。DLC（Diamond Like Carbon）镀层也可用 PVD 法形成。DLC 镀层的最大特点是在所有镀层当中硬度最高且摩

擦因数较小，用于模具时耐黏附性很好，不过镀层本身的耐冲击性仍然是有待解决的课题。

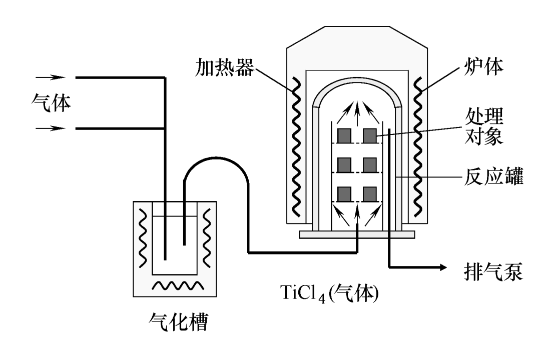


图 5-31　CVD 法的机理

表 5-3　CVD 反应举例

镀　　层	化 学 反 应
TiC	$TiCl_4(G)+CH_4\ (G)\xrightarrow[950\sim1050℃]{H_2}TiC+4HCl(G)$
TiN	$TiCl_4(G)+1/2N_2(G)\xrightarrow[850\sim1000℃]{H_2}TiN+4HCl(G)$
TiCN	$2TiCl_4+2CH_4(G)+N_2\xrightarrow[900\sim1050℃]{H_2}2TiCN+8HCl(G)$

表 5-5 为 PVD、CVD 及 TD 镀层的比较。PVD 处理、CVD 处理和 TD 处理三者最大的不同在于处理温度。PVD 是 600℃ 以下的低温热处理，因此具有热处理尺寸变化和变形较小的特点。与此相比，CVD 是 1000～1100℃ 的热处理，因此热处理尺寸变化和变形难以避免。特别是 CVD 处理在炉冷状态进行，所以要再次进行淬火。CVD 和 TD 处理在高温进行的优点是硬化层与母材的附着性，即镀层的附着性较好。

表 5-4　镀层种类和特点

镀层种类	颜色	硬度 HV	摩擦因数	耐蚀性	耐氧化性	耐磨性	耐黏附性	用　途
TiN	金黄色	2000～2400	0.45	○	○	○	○	切削刀具、模具、装饰件
ZrN	金白色	2000～2200	0.45	○	△	△	△	装饰件
CrN	银白色	2000～2200	0.30	◎	○	○	◎	机械部件
TiC	银白色	3200～2800	0.10	△	△	◎	○	切削刀具
TiCN	暗紫色	3000～3500	0.15	△	△	◎	○	切削刀具、模具
TiAlN	暗紫色	2300～2500	0.45	○	◎	○	○	切削刀具、模具、装饰件
Al_2O_3	浅灰色	2200～2400	0.15	○	◎	○	○	绝缘膜、功能膜
DLC	深灰色	3000～5000	0.10	○	○	○	◎	切削刀具、功能膜、模具

注：◎为优，○为一般，△为稍差。

表 5-5　各种镀层的比较

项　目	PVD	CVD	TD
复合层	TiN，TiCN TiAlN，DLC	TiC，TiN TiCN，Al_2O_3	VC，NbC
处理方法	等离子反应	热化学反应	热反应、析出扩散
处理温度	200～600℃	700～1100℃	1000～1100℃
操作性	◎	○	△
遮蔽性	◎	△	△
精度	◎	△	△
附着性	○～◎	◎	◎
应用性	◎	△	△

注：◎为优，○为一般，△为稍差。

3. 复合镀层

最近，为了提高模具的耐磨性、耐蚀性、耐黏附性及耐热龟裂性而采用复合镀层。虽然复合镀层在形成原理上大致相同，但各公司纷纷开发出了具有独自特性的镀层。其中有一种叫做等离子 CVD 镀层，是采用先预热后再进行 PVD 处理的方法形成的。（TiAl）N 系复合镀层在耐蚀、耐咬伤、耐热龟裂的改善方面取得了显著成效[15]。

其他方法还有先在不形成化合物层的条件下进行处理，比如像自由基渗氮之类的特殊氮化，然后再进行 PVD 处理的方法。附着 CrN 镀层的压铸模部件对耐蚀性和耐咬伤性有改善效果[16~18]。

复合镀层在模具上的应用才开始不久，今后各具特色的复合镀层开发和应用一定会取得更大的进步。

参 考 文 献

[1] 佐藤忠雄，相澤力：プレス型材料と熱処理，日刊工業新聞社（1972）
[2] 西村富隆：熱処理，vol. 14（1974），No. 6，p334
[3] 佐藤智雄，西澤泰二，村井弘佑：鉄と鋼，vo. 44（1958），p565
[4] 須藤一，田村今男，西澤泰二：金属組織学，丸善（1972），p187
[5] J. H. Hollomon，L. D. Jaffe：Trans. AIME，vol. 162（1945），p223
[6] 大同特殊鋼（株）：特殊鋼ハンドブック（1999），p174
[7] 西村富隆：熱処理，vol. 19（1979），No. 1，p37
[8] 上原紀興，並木邦夫，高橋国男：電気製鋼，vo. （1981），No. 3，p165
[9] 奥野利夫：鉄と鋼，vol. 36（1996），No. 6，p655
[10] 西村富隆：熱処理，vol. 36（1996），p230
[11] NADCA Die Materials Committee：NADCA 207-97（1997）
[12] 大同特殊鋼（株）：カタログ「大同のドリームシリーズ」（2004）
[13] 太刀川英男，新井透：型技術，vol. 5（1990），No. 10，p18
[14] 池永優，鈴木秀人：ドライプロセスによる超硬質皮膜の原理と工業的応用，日刊工業新聞社（2000）
[15] 河田一喜：電気製鋼，vol. 76（2005），No. 4，269
[16] 池永勝：熱処理技術協会，第 4 回熱処理技術セミナー（2004），2 月

[17] 武田裕正，金子浩幸，小野寺敏：電気製鋼，vol. 75 (2004)，No. 4，p277
[18] 渡部清彦：型技術，vol. 18 (2003)，No. 12，p25

专栏 6

金相组织学的地图——相图

在从事与钢铁相关的工作时，总会听到“相图”这个词，或者实际中会看到过几种相图。严格来说它应叫做平衡相图，是表示各种组成的金属在极为缓慢的速度下进行加热或冷却时，形成不同的晶体结构（原子排列）或微观组织的图。因此也可称其是以组成和温度为坐标轴的“地图”，即标明所定成分和温度下的晶体结构的地图。

晶体结构的变化一定会带来热量变化，所以早在 100 年前金相学开始时，就已经通过分析各种合金在缓慢加热和冷却时所表现出来的膨胀和收缩来捕捉晶体结构的变化（相变），作成了相图。如今已到了通过热力学计算就可以得到相图的时代。

第 6 章

模具材料的制造方法

对于模具材料，前面已经就其内容、性能、热处理方法等作了介绍。那么，模具材料本身又是怎样被制造出来的呢?

模具材料中使用最多的工模具钢，是最具有代表性的特殊钢。本章将对不同于普通钢的特殊钢是如何被制造的，又是如何被赋予各种特殊性能的等内容加以介绍。

6.1 特殊钢的制造方法

特殊钢的制造方法，尤其是熔炼方法与普通钢大不相同。

普通钢以铁矿石为原料，在大规模炼钢厂进行生产。铁矿石在高炉（冶炼炉）内被由焦炭和热风生成的煤气还原，并进一步增碳，成为铁液，然后将此铁液在 LD（Linz-Donawitz）转炉内进行高温氧化精炼，并添加硅、锰、铝等再次脱氧后，经连续铸造制成小钢坯、大钢坯及扁钢坯等，或者铸成钢锭后经开坯制成半成品，其后，再加热并压延成最终形状产品。

特殊钢的熔炼则是从电炉开始的，其生产工艺流程如图 6-1 所示[1]。所用主要原料是废钢，将其用电炉熔化并进行各种精炼及对合金成分进行调整后，经连续铸造制成钢坯或直接浇注成铸锭，然后利用压延或锻造制成所需形状的产品。特殊钢中工模具钢的生产工艺流程如图 6-2 所示。下面将就各工艺流程的细节进行说明。

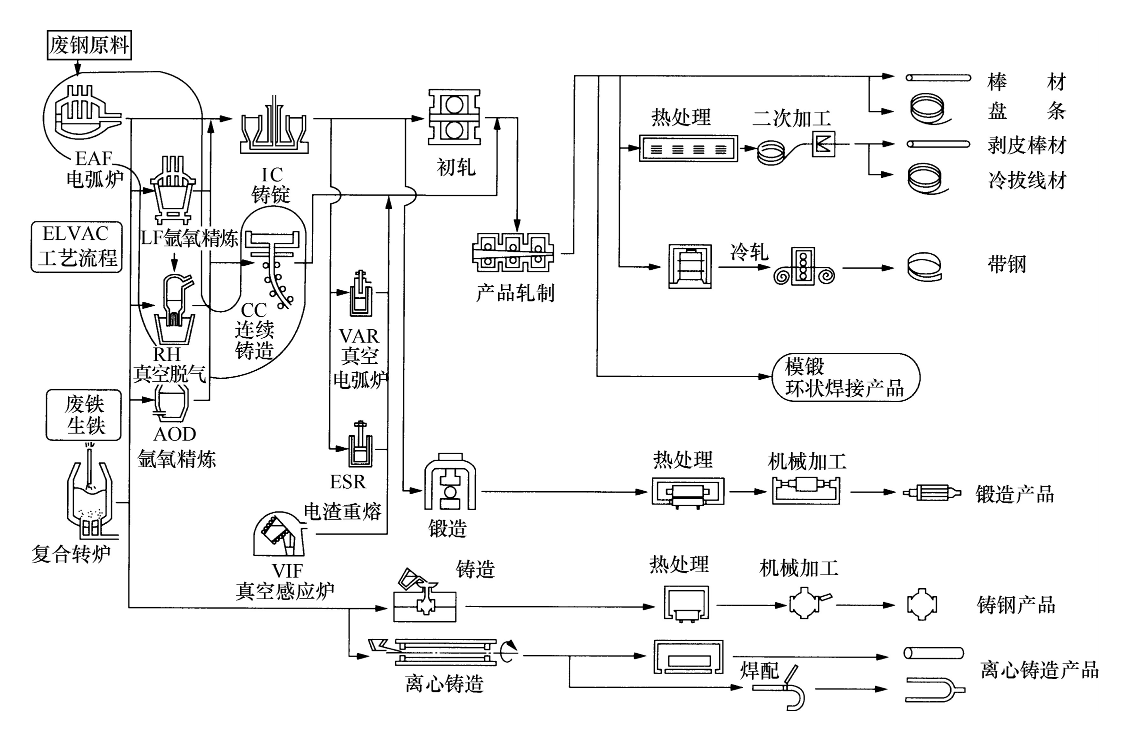


图 6-1　特殊钢的生产工艺流程

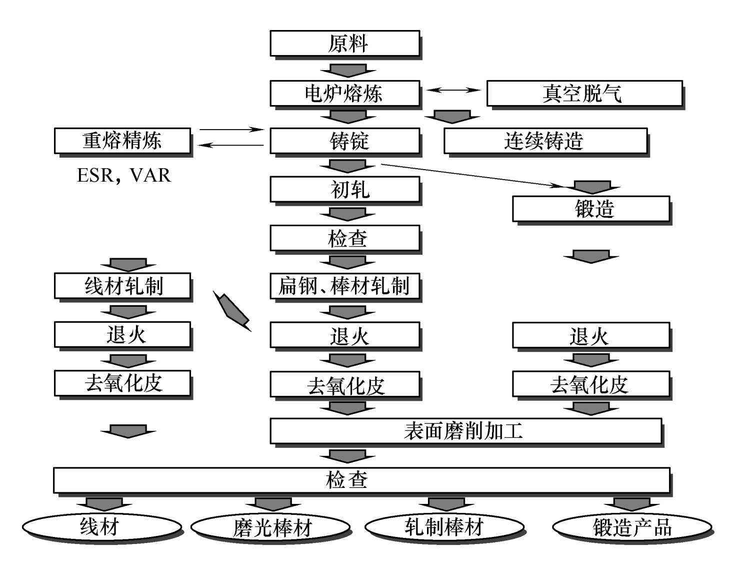


图 6-2　工模具钢的生产工艺流程

6.2　熔炼和精炼

工模具钢用电弧炉熔炼。将经过成分分类管理的废钢装入电弧炉，并使之与石墨电极产生电弧来进行熔炼，这就是电弧炉熔炼（Electric Arc Furnace Melting）。其炼钢规模最小至5t左右，而最大可达到200t级。

电弧炉熔炼过程本应是在氧化精炼之后，再经还原精炼进行成分调整。不过当今一般只是在电弧炉中进行熔化及氧化精炼，而还原精炼步骤是利用炉外精炼来完成的。被称为LF、RH、AOD精炼等的方法即属于炉外精炼。图6-3所示为电弧炉熔炼和炉外精炼工艺。

LF是Ladle Furnace（钢包精炼炉）的简称，于20世纪70年代初期由当时的日本特殊钢（现在为大同特殊钢）研制而成。这是将经电炉熔化的钢液移到钢包中，并在利用石墨电极通电保温的同时进行熔渣精炼的过程。另外，还从炉底通入氩气加以搅拌来促进精炼。

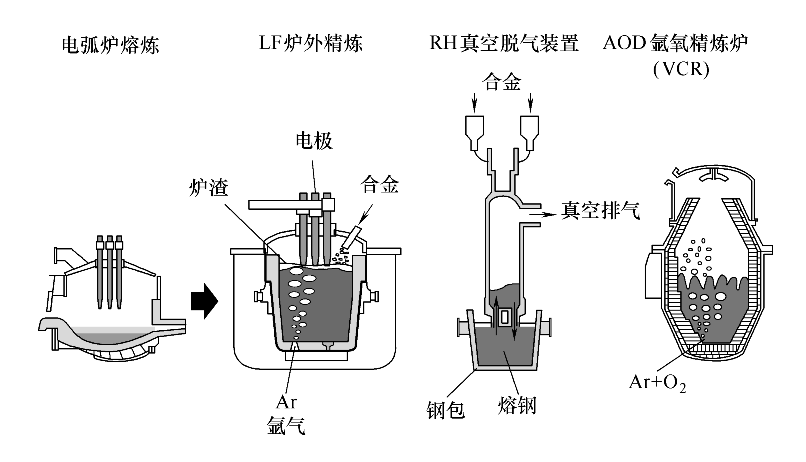


图 6-3　**电弧炉熔炼和炉外精炼工艺**

LF 的特点：在品质方面可以控制成分达到超低硫（S）和低氧（O）来实现纯净钢熔炼，在生产方面可以省略还原步骤来提高生产率，并可精确控制铸造温度以便调整浇注时间。如上所述，LF 为提高电炉的生产率及材料品质做出了很大贡献。

RH 脱气法也是炉外精炼的一种，于 1959 年由西德的鲁尔（Ruhrstah）公司（现为蒂森克虏伯公司）和贺利氏（Heraus）公司联合研制。将钢液移至钢包后，把带有浸入管的真空室罩套到钢液上，然后进行减压即可将钢液抽上来；同时向单方向浸入管吹入提升气体可使钢液形成回流，钢液在通过真空室时得到脱气。

该方法的特点是：钢液与真空的接触面积大，从而脱气效率高，而且容易进行成分控制。现已形成了电弧炉—LF—RH 脱气的连续配套精炼技术，并与后续的连续铸造工序相贯通的制造方法，广泛用于结构钢等的生产[2]。

AOD（Argon Oxygen Decarburizing）是氩氧脱碳精炼法。此方法于 1950 年由联合碳化物（Union Carbide）公司开始研发，到了 1968 年由乔斯林钢铁（Joslyn Steel）公司（现为史莱特钢铁公司）实现了工业应用，现已成为不锈钢精炼的主要方法。其过程是将钢液装入 AOD 炉后，从炉底侧壁吹入氩气和氧气，使碳（C）转化成 CO 气体，可抑制

铬的氧化而达到极低含碳量水平的脱碳。随后又开发出了 AOD- VCR 精炼法，即通过在 AOD 上附加减压精炼功能，实现了无吹氧低碳范围脱碳工艺，为制造碳、氮含量极低的不锈钢做出了贡献[3]。

6.3 重熔精炼

有些钢种为了达到更好的品质而进行真空电弧重熔及电渣重熔等重熔精炼。近些年来，模具趋于大型化，所要求的特性也逐渐多样化、高端化，因此利用重熔精炼钢来强化品质的情况越来越多。

6.3.1 真空电弧重熔

真空电弧重熔（Vacuum Arc Remelting，VAR）设备的结构如图 6-4 所示。母材（自耗电极）是经电弧炉或真空感应炉等熔炼的钢锭。将母材放入压强为 10^{-3} Torr㊀的真空室中，在自耗电极和铜制水冷结晶器之间施加直流电压，利用其产生的电弧热使电极自下而上逐步熔化，汇集成液滴落入水冷结晶器中再逐层凝固成新的钢锭。

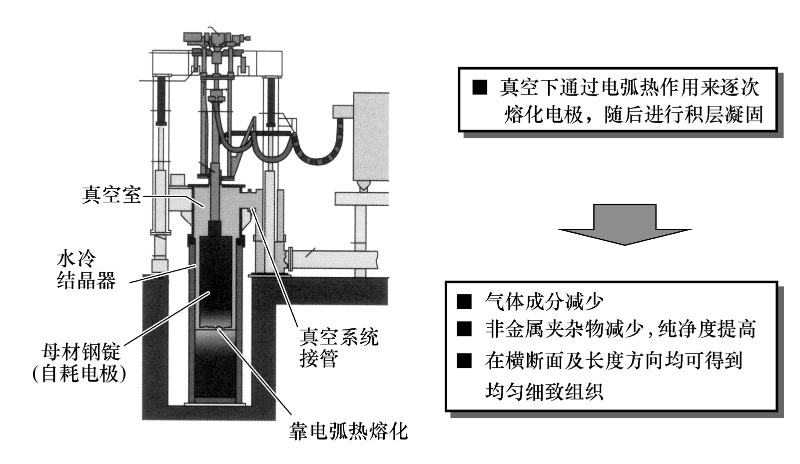


图 6-4 真空电弧重熔设备的结构

㊀ 1Torr = 133.322Pa。——编者著

由于是在真空中进行的熔化和凝固，特别是氧气和氢气成分几乎被脱去，因此氮也在一定程度上得以减少。其结果是较大的夹杂物几乎消失，可得到氧化系非金属夹杂物极少的纯净钢。此外，经水冷结晶器的急冷凝固而使组织致密，最终可得到没有显微偏析的微细组织。不过，与 ESR（电渣重熔）相比，钢锭表面质量要差一些。

6.3.2 电渣重熔

电渣重熔（Electro Slag Remelting）设备的结构如图 6-5 所示。所用母材与 VAR 相同，是预先经电炉熔炼的钢锭，其不同之处是熔化的热源和气氛。先在水冷铜制结晶器的底部和电极之间通电使电渣熔融，其后向熔融电渣直接通电，利用其电阻热来熔化母材（自耗电极）。

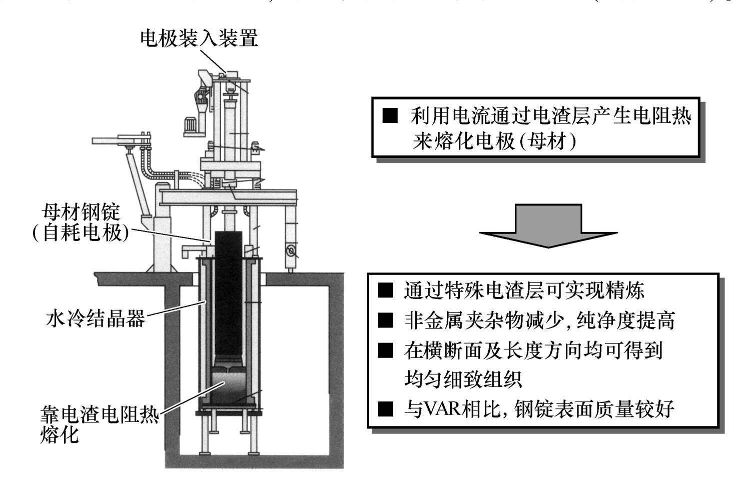


图 6-5 电渣重熔设备的结构

此外，电渣重熔的气氛是大气，但因熔化的金属液滴落到含有 CaF_2、CaO、Al_2O_3 的特殊电渣（助熔剂）中时，杂质及夹杂物等被电渣吸附并浮于表面而被除去，从而得到精炼。特别是 CaO 对去除 S 和 O 有效，S 的去除率约为60%，O 的去除率约为50%，这样可以大幅度降低硫化物系夹杂物。它与 VAR 一样是局部熔化后在铜制结晶器内急冷凝固，所以钢锭的上下、内外均可得到均匀细致的组织。

再有，与 VAR 相比，ESR 有以下特点：无须真空设备因而费用较低，由于是利用电渣精炼，所以钢锭表面质量较好，即使大截面钢锭也可得到均匀的组织等。

6.3.3　适合重熔精炼的模具钢举例

表 6-1 为适合重熔精炼的模具钢实例及特点。塑料模具钢 NAK55 含有易切削元素硫，所以适于利用 VAR 来进行重熔精炼，通过降低氧化系夹杂物来提高镜面性。NAK80 钢是低硫钢，适于利用 ESR 来精炼。重熔精炼钢不仅镜面性好，蚀纹加工性也相当出色，适用于制作高品质塑料模具。

表 6-1　适合重熔精炼的模具钢实例及特点

<table>
<tr><th>重熔方式</th><th>钢种分类</th><th>牌号</th><th>特　　点</th></tr>
<tr><td>VAR</td><td rowspan="5">塑料模具钢</td><td>NAK55</td><td rowspan="5">● 通过提高纯净度改善镜面性
● 通过减少偏析改善蚀纹性
● 截面及长度方向的性能平衡得到改善</td></tr>
<tr><td rowspan="9">ESR</td><td>NAK80</td></tr>
<tr><td>PD613</td></tr>
<tr><td>S-STAR</td></tr>
<tr><td>MAS1C</td></tr>
<tr><td rowspan="3">热作模具钢</td><td>DHA1-A</td><td rowspan="3">● 通过减少微观偏析改善韧性和耐热龟裂性</td></tr>
<tr><td>DH31-EX</td></tr>
<tr><td>DH21</td></tr>
<tr><td rowspan="2">高速工具钢</td><td>SKH51</td><td rowspan="2">● 通过减少微观偏析及细化碳化物改善韧性</td></tr>
<tr><td>DRM</td></tr>
</table>

马氏体不锈钢系高强度耐蚀塑料模具钢也是经 ESR 重熔精炼的钢种，多用于超高镜面模具，所以精炼的目的主要是减少微细夹杂物以便抑制针孔的产生。

有关热作模具钢，如 SKD61 钢，为改善压铸模的韧性已普遍采用 ESR 精炼法，高性能热作模具钢是利用 ESR 来制造的。使用重熔精炼虽然会增加成本，不过从提高模具附加值的角度来综合考虑的

话，今后其优势会更加显著。

6.4　锻钢和轧钢的制造方法

工模具钢及锻钢的制造方法如图 6-6 所示。钢液浇入钢锭模中凝固成钢锭。工模具钢的钢锭质量通常为 0.5 ~ 10t，需重熔精炼时则成为 VAR 或 ESR 等的母材钢锭。将这些钢锭加热到约 1200℃ 的高温进行保温，这个过程称为热扩散处理（Soaking），目的是通过元素扩散来达到均匀化。之后，用锻压机进行锻造。日本国内的锻压机最大加压能力约为 15000t。其锻造目的归纳如下：

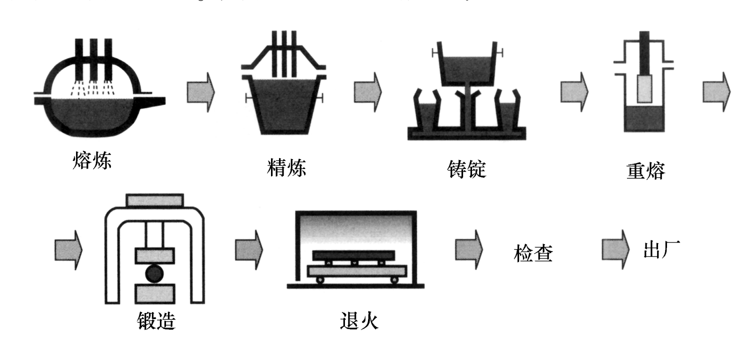


图 6-6　工模具钢及锻钢的制造方法

1）将钢锭锻造成便于进一步锻造及轧制的坯料，或直接精锻成最终产品。

2）细化钢锭的粗大凝固组织。

3）减轻钢锭的中心偏析，压合细小缺陷。

将钢锭初始横截面积与锻造后横截面积的比值称作锻造比。随锻造比的增加，凝固组织逐渐破碎成微细组织，微小缺陷也得到消除，从而使韧性和延展性提高。一般来说，锻造比超过 5 之后韧性几乎达到饱和，所以将此作为最低锻造比。锻造时，将钢锭沿轴向压缩的镦锻以及沿轴向伸长的锻造均能实现。通过两个方向的锻造，可以使最终产品的力学性能，尤其是韧性和塑性等各向异性得到改善。

另外，在实际锻造操作中，还需要考虑钢锭的加热温度和时间、脱碳层和氧化皮厚度、锻造加载方式以及最终精锻温度等，并应根据不同钢种来决定最佳条件。

轧制产品的横截面积较小，可以用钢锭来轧制。对可以进行连续铸造的钢种，也可用连铸钢坯加热后轧制成最终产品。这一过程如图 6-7 所示。轧制过程和锻造一样，可通过减小横截面积来改善凝固组织，从而实现微细化。其特点是可利用孔型来简单地制得各种尺寸的产品。

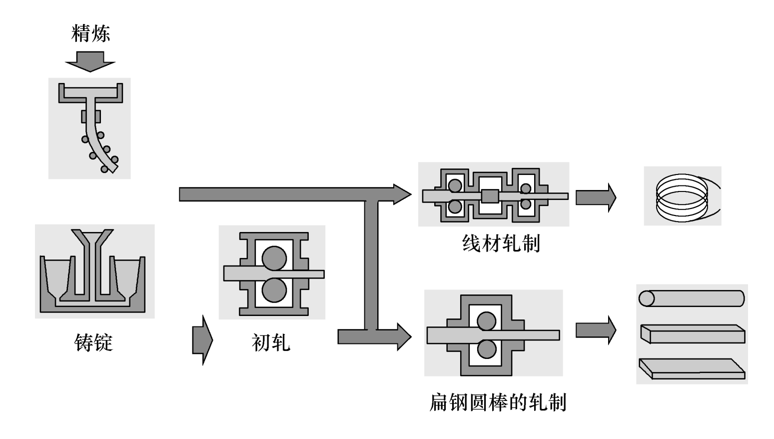


图 6-7　轧钢的制造方法

钢材经锻造或轧制达到所需形状和尺寸后，若为工模具钢，则需要进行球化退火处理。其目的是降低硬度，改善切削性，以便进行机械加工，还可作为淬火和回火的预备组织，以便淬火回火后球状碳化物均匀分散，保证耐磨性和韧性的平衡。为得到最佳退火组织，有时还对其前身组织进行正火。各种模具钢的退火条件已在第 4 章进行了介绍。

6.5　粉末高速工具钢的制造方法

如前所述，工模具钢一般是经熔炼、锻造、轧制等热加工过程制

造而成的。不过也有些高合金高速工具钢，如用熔炼法制造，会因一次碳化物过于粗大且偏析严重而不能使用。这种情况下，可利用粉末制钢法。20 世纪 70 年代初，瑞典 STORA 公司和美国 Crucible 公司开始了粉末高速工具钢的生产。

图 6-8 所示为粉末高速工具钢的制造方法[4]。将原材料先用高频感应炉等熔化后装入中间钢包，然后经喷嘴喷出，此时用 0.2 ~ 4MPa 的压力喷射氮气、氩气等惰性气体，可制得大小为 100 ~ 500μm 的球状粉末。由于其是超急冷凝固，因此可得到均匀细致的碳化物组织。

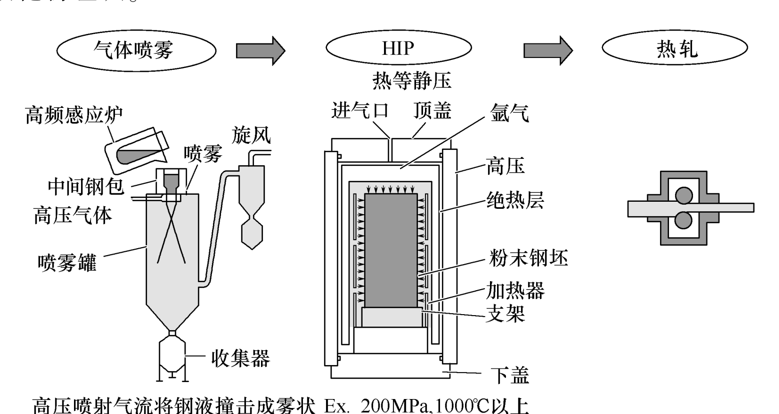


图 6-8　粉末高速工具钢制造方法

气体喷雾法（Gas Atomazing）于 20 世纪 70 年代在瑞典 ASEA 公司得到工业化应用。在喷雾方法当中，还有粉末形状不规则的液体喷雾法、真空喷雾法、离心喷雾法等。一般用于制造高速工具钢的是气体喷雾法和液体喷雾法。另外，为进一步提高纯净度，从熔化到喷雾均在与大气隔绝的环境中进行的方法也得到了应用[5]。

喷雾而成的微细粉末经分级筛选后装填到不锈钢管中，利用热等静压（Hot Isostatic Press，HIP）成形法制成钢坯。HIP 法由美国 Battell 研究所于 1955 年研制成功，这是以氩气为介质，在 1000℃ 以上的

高温和 100～200MPa 压力下成形的方法。

将成形的钢坯按通常热轧程序轧制到所需尺寸，最后把护套管切掉除去即成为粉末高速工具钢产品。

粉末高速工具钢的制造方法与通常熔炼法相比有如下特点：

1）可制得通常熔炼法不能制造的高合金钢。

2）微细碳化物均匀分散，所以韧性高、尺寸变化均匀。

3）具有优异的塑性加工性、切削性、研磨性等。

不过，制造成本高还是有待解决的课题。

6.6 二次加工

由图 6-1 所示的特殊钢生产工艺流程可知，工模具钢也可在轧制及退火后拉拔成细棒和细丝，或经切削加工制成光面产品。这些后续深度加工称为二次加工。

将轧制钢棒或线材的氧化膜经酸洗去除，并涂布润滑膜后进行拉拔加工。拉拔加工的目的是单纯缩小尺寸或形成异形截面。钢种不同，不发生开裂所能达到的最大拉拔量（面缩率）也不同，所以当超过限度时需要在中间退火后进行第二道拉拔，接下来依次进行矫正、无心磨削、切断和检验后出厂。通过二次加工可得到所需形状和尺寸，有助于减少后续机械加工工时，与轧制产品相比，精度要高出一个级别。有时还可根据需要，利用加工硬化来调整强度，这是其特点。

6.7 模具材料的检验项目与试验方法

模具材料的检验及试验大致可分为两类：一类是组织试验，包括宏观组织试验、微观组织试验、晶粒度试验等；另一类是材料试验或叫做机械试验，有硬度试验、拉伸试验、磨损试验等。模具材料的主要检验项目见表 6-2。

表 6-2　模具材料的主要检验项目

检验项目		JIS	检验方法或内容
化学成分检验		G0320	炉前分析
组织检验	宏观组织	G0553	宏观腐蚀
	微观组织	—	光学显微镜观察
	纯净度	G0555	非金属夹杂物
	晶粒度	G0551	奥氏体晶粒等级号数
力学性能检验	硬度试验	Z2243	布氏硬度
		Z2244	维氏硬度
		Z2245	洛氏硬度
		Z2246	肖氏硬度
	拉伸试验	Z2241	抗拉强度、屈服强度 伸长率、断面收缩率
	冲击试验	Z2242	冲击韧度
无损检测	渗透探伤	—	外观缺陷
	超声波探伤	Z2344	内部缺陷

6.7.1　化学成分

JIS 标准针对化学成分的检验有钢材的钢液分析法（JIS G 0320）[6] 和钢材的产品分析法及其允许偏差值（JIS G 0321）[7] 两种规定。钢液分析法是对由钢包浇注到钢锭模后的未凝固钢液进行采样分析。钢材从厂家出厂时附带的出厂证明书（出厂成绩表或检验单）中所记载的钢液分析结果即为此项数据。每次熔炼都会出一份分析值报告，表示同一炉钢液的平均化学成分。小型分析用试样经采样凝固后，按照 JIS 标准规定的分析法、火花放电发射光谱法、荧光 X 射线分析法等来进行分析。

产品分析法是对从轧制或锻造产品上切取的试样进行分析。产品的分析值会因偏析而与钢液分析值有所不同，另外分析试样之间也会存在差异，所以钢材标准对超出所定钢液分析上下极限值的数值范围

作了规定。

6.7.2 组织检验

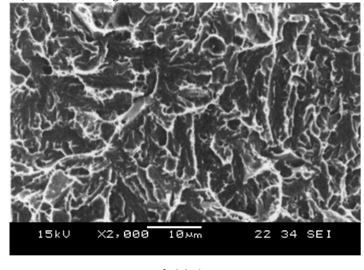
1. 宏观组织检验（JIS G 0553）[8]

这是从钢材的横截面切取试样进行研磨，并用盐酸、氯化铜铵、硝酸酒精、硝酸水溶液等腐蚀后，对树枝状晶、钢锭花样、中心偏析、疏松、麻点、气泡、夹杂物等组织缺陷用肉眼进行判定的方法。被观察面的表面粗糙度值通常需达到 Ra 30～3.5μm（JIS B 0601 中评定轮廓的算数平均偏差）。

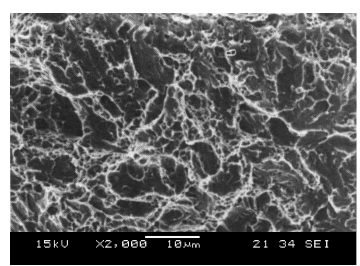
2. 断口观察

JIS 标准中没有相应规定，这是在目标部位开出缺口并使之强行断裂后，用肉眼进行观察的方法。从断口的纹理来推定开裂的起点和走向，可判别晶粒度和夹杂物等。

还有一种断面观察方法是扫描电镜（Scanning Electron Microscope，SEM）法。其在材料制造阶段用不到，在此作为参考对其进行简单介绍。扫描电镜法是将观察试样放到电子显微镜里进行电子束扫描，然后利用由此激发出的二次电子和背散射电子进行解析的方法，可清晰地观察到凹凸不平的断口。图 6-9 所示为冲击试样断口的扫描电镜照片。利用扫描电镜进行断口观察，有助于分析失效形式和原因。



脆性断口



韧性断口

图 6-9 冲击试样断口的扫描电镜照片

（热作模具钢 SKD61：硬度 45HRC）

3. 微观组织观察

微观组织观察法在 JIS 中没有相应规定，是指利用光学显微镜和电子显微镜进行观察的方法。从目标部位切取试样，可根据需要将其镶嵌到树脂托架中进行研磨，大概磨到 1000#左右改用钻石膏等微细磨料进行抛光，然后根据钢种选用不同的腐蚀液进行腐蚀、使其显现出微观组织。对于模具钢来说，可用硝酸酒精溶液和苦味酸酒精溶液腐蚀。

一般用光学显微镜，从 100 倍左右的低倍到最高的 1000 倍范围进行观察。

4. 非金属夹杂物的显微镜试验方法（JIS G 0555）[9]

钢中残留非金属夹杂物是不可避免的，但形状过大或数量过多都会使力学性能及镜面性下降。夹杂物的减少程度称为纯净度。

该方法是对锻造比在 3 以上的轧制或锻造产品中的非金属夹杂物，用显微镜对照标准图进行测定的方法。图 6-10 所示为具有代表性的非金属夹杂物的种类和形态，包括硫化物系、氧化铝系、硅酸盐系、粒状氧化物系及个别粒状夹杂物系等。另外，作为夹杂物的评定指标，有将夹杂物分布形态用图表指数来表征的

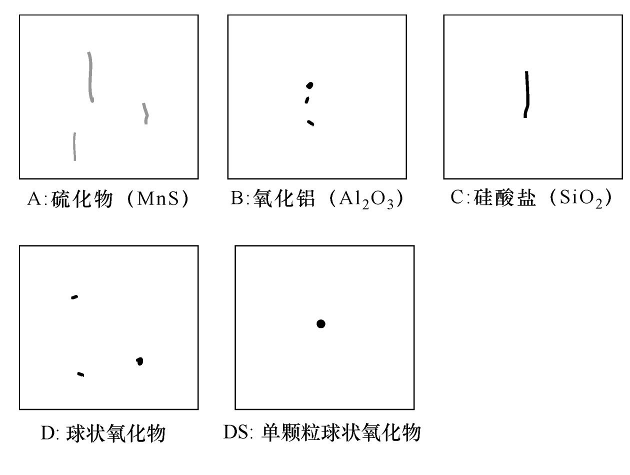


图 6-10　非金属夹杂物的种类和形态

级别评定，还有按薄系列和厚系列划分的用来评定厚度的夹杂物厚度参数。

5. 晶粒度的显微测定方法（JIS G 0551）[10]

这是用于测定钢中铁素体或奥氏体晶粒度的显微镜试验法。铁素体晶粒度适用于 $w(\mathrm{C}) < 0.25\%$ 的碳素钢或铁素体型不锈钢。

奥氏体晶粒度是加热到 Ac_3、Ac_1 或 A_{cm} 以上时所显现的晶粒大小，通常用腐蚀液显现出组织后，对照晶粒度标准图或用装夹在光学显微镜目镜上的标尺来进行测定。所测晶粒级别达 5 以上的为细晶粒钢，未满 5 级的为粗晶粒钢。混合晶粒是指同一视场内，有与优势晶粒度级差大于 3 级且所占面积超过 20% 的晶粒存在时，或者不同视场之间的晶粒度级差超过 3 级时的状况。

其他还有利用直线和曲线试验线穿过或捕捉的晶粒数或与晶粒的截点数来表示的方法。

6. 其他方法

在模具材料相关规定中，还有表面伤痕宏观试验法（JIS G 0556）及脱碳层深度测定方法（JIS G 0558）等规定。

6.7.3　力学性能试验

1. 硬度试验

硬度试验是预测模具材料的强度和耐磨性的简便方法。硬度的测定方法虽有多种，但基本上分为压入硬度法和反弹硬度法两类。

压入硬度法是将压头压入试验材料并通过测定其压痕大小来表示硬度的方法，常用的有布氏硬度试验、维氏硬度试验、洛氏硬度试验。

布氏硬度试验（JIS Z 2243）[11] 与其他压入硬度试验相比，压入力度和压痕较大，适于测定材料整体的平均硬度。所以常用来测定工模具钢中的锻钢和轧钢等。压头为硬质合金，试验力、压头直径、压痕直径可选用推荐配套组合。

维氏硬度试验（JIS Z 2244）[12] 的压头是正四棱锥金刚石。因为

即使试验力变化，硬度也会保持一定，所以不受试样大小、厚度和测定区域大小的限制，可通过改变试验力来进行测定，比如可用于对从表层到内部有硬度变化的氮化层及渗碳层的硬度分布进行测定。

洛氏硬度试验（JIS Z 2245）[13]通过三种试验力和两种压头（圆锥形金刚石、硬球）的组合，可对较大范围的硬度进行测定。测定时用金刚石压头或硬球压头先施加初始试验力，再施以全试验力，然后返回到初始试验力，通过压头的压入深度差即可求出硬度。

肖氏硬度试验（JIS Z 2246）[14]是使撞销从一定高度落下冲击试验材料，根据撞销弹性回跳的高度来表征材料硬度的试验。试验设备是小型便携式且操作简便，所以便于大型件硬度的测定。加之压头较小，对热处理件也可进行测定。不过，肖氏硬度试验容易产生人为测定误差，可以作为参考值，而且由于是反弹硬度，还存在易受表面形状及残余应力影响的弱点。

这些硬度之间有换算关系，表 6-3 为其中的一部分内容[15]。

2. 拉伸试验（JIS Z 2241）[16]

拉伸试验是对试样仅施以轴向载荷并缓慢拉伸至断裂，由此求得屈服强度、抗拉强度、断后伸长率、断面收缩率等值的试验。JIS 中对各种试样有所规定。图 6-11 所示为较具有代表性的 JIS 4 号试样的拉伸试样示意图。拉伸时的载荷用载荷传感器测定，其伸长量用标尺测量。就工模具钢来说，由于不出现屈服现象，因此利用负荷—伸长曲线来找出对应 0.2% 残留塑性变形的应力，并将其作为 0.2% 屈服应力。各种特性值的计算方法如下：

屈服强度(MPa) = 屈服载荷(N)/试样的原始截面积(mm^2)

抗拉强度(MPa) = 最大载荷(N)/试样的原始截面积(mm^2)

断后伸长率 A = (断裂后的标距长度 − 原始标距长度)/原始标距长度

断面收缩率 Z = (原始截面积 − 断裂后最小截面积)/原始截面积

表 6-3　基于布氏硬度的钢材硬度概略换算表（摘自 SAE J 417 DEC83）

布氏压痕直径/mm	布氏硬度 10mm 球负荷 3000kgf		维氏硬度	洛氏硬度（2）				表面洛氏硬度 金刚石　圆锥压头			肖氏硬度	抗拉强度（近似值）/MPa（kgf/mm²）	布氏压痕直径/mm
	标准球	WC 球		A 标尺 60kgf 金刚石圆锥压头	B 标尺 100kgf 1. 6mm 压头	C 标尺 150kgf 金刚石圆锥压头	D 标尺 100kgf 金刚石圆锥压头	15-N 标尺 15kgf	30-N 标尺 30kgf	45-N 标尺 15kgf			
—	—	—	940	85. 6	—	68. 0	76. 9	93. 2	84. 4	75. 4	97	—	—
—	—	—	920	85. 3	—	67. 5	76. 5	93. 0	84. 0	74. 8	96	—	—
—	—	—	900	85. 0	—	67. 0	76. 1	92. 9	83. 6	74. 2	95	—	—
—	—	[767]	880	84. 7	—	66. 4	75. 7	92. 7	83. 1	73. 6	93	—	—
—	—	[757]	860	84. 4	—	65. 9	75. 3	92. 5	82. 7	73. 1	92	—	—
2. 25	—	[745]	840	84. 1	—	65. 3	74. 8	92. 3	82. 2	72. 2	91	—	2. 25
—	—	[733]	820	83. 3	—	64. 7	74. 3	92. 1	81. 7	71. 8	90	—	—
—	—	[722]	800	83. 4	—	64. 0	73. 8	91. 8	81. 1	71. 0	88	—	—
2. 30	—	[712]	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	2. 30
—	—	[710]	780	83. 0	—	63. 3	73. 3	91. 5	80. 4	70. 2	87	—	—
—	—	[698]	760	82. 6	—	62. 5	72. 6	91. 2	79. 7	69. 4	86	—	—
—	—	[684]	740	82. 2	—	61. 8	72. 1	91. 0	79. 1	68. 6	—	—	—

（续）

布氏压痕直径/mm	布氏硬度 10mm球负荷3000kgf		维氏硬度	洛氏硬度（2）				表面洛氏硬度 金刚石 圆锥压头			肖氏硬度	抗拉强度（近似值）/MPa（kgf/mm²）	布氏压痕直径/mm
	标准球	WC球		A标尺 60kgf 金刚石圆锥压头	B标尺 100kgf 1.6mm压头	C标尺 150kgf 金刚石圆锥压头	D标尺 100kgf 金刚石圆锥压头	15-N标尺 15kgf	30-N标尺 30kgf	45-N标尺 15kgf			
2.35	—	[682]	737	82.2	—	61.7	72.0	91.0	79.0	68.5	84	—	2.35
—	—	[670]	720	81.8	—	61.0	71.5	90.7	78.4	67.7	83	—	—
—	—	[656]	700	81.3	—	60.1	70.8	90.3	77.6	66.7	—	—	—
2.40	—	[653]	697	81.2	—	60.0	70.7	90.2	77.5	66.5	81	—	2.40
—	—	[647]	690	81.1	—	59.7	70.5	90.1	77.2	66.2	—	—	—
—	—	[638]	680	80.8	—	59.2	70.1	89.8	76.8	65.7	80	—	—
—	—	630	670	80.6	—	58.8	69.8	89.7	76.4	65.3	—	—	—
2.45	—	627	667	80.5	—	58.7	69.7	89.6	76.3	65.1	79	—	2.45
2.50	—	—	677	80.7	—	59.1	70.0	89.8	76.8	65.7	—	—	2.50
2.50	—	601	640	79.8	—	57.3	68.7	89.0	75.1	63.5	77	—	2.50
2.55	—	—	640	79.8	—	57.3	68.7	89.0	75.1	63.5	—	—	2.55
2.55	—	578	615	79.1	—	56.0	67.7	88.4	73.9	62.1	75	—	2.55

（续）

布氏压痕直径/mm	布氏硬度 10mm 球负荷 3000kgf		维氏硬度	洛氏硬度（2）				表面洛氏硬度 金刚石 圆锥压头			肖氏硬度	抗拉强度（近似值）/MPa（kgf/mm^2）	布氏压痕直径/mm
	标准球	WC 球		A 标尺 60kgf 金刚石圆锥压头	B 标尺 100kgf 1.6mm 压头	C 标尺 150kgf 金刚石圆锥压头	D 标尺 100kgf 金刚石圆锥压头	15-N 标尺 15kgf	30-N 标尺 30kgf	45-N 标尺 15kgf			
2.60	—	—	607	78.8	—	55.6	67.4	88.1	73.5	61.6	—	—	2.60
2.60	—	555	591	78.4	—	54.7	66.7	87.8	72.7	60.6	73	2055［210］	2.60
2.65	—	—	579	78.0	—	54.0	66.1	87.5	72.0	59.8	—	2015［205］	2.65
2.65	—	534	569	77.8	—	53.5	65.8	87.2	71.6	59.2	71	1985［202］	2.65
2.70	—	—	553	77.1	—	52.5	65.0	86.7	70.7	58.0	—	1915［195］	2.70
2.70	—	514	547	76.9	—	52.1	64.7	86.5	70.3	57.6	70	1890［193］	2.70
2.75	［495］	—	539	76.7	—	51.6	64.3	86.3	69.9	56.9	—	1855［189］	2.75
2.75	—	—	530	76.4	—	51.1	63.9	86.0	69.5	56.2	—	1825［186］	2.75
2.75	—	495	528	76.3	—	51.0	63.8	85.9	69.4	56.1	68	1820［186］	2.75
2.80	［477］	—	516	75.9	—	50.3	63.2	85.6	68.7	55.2	—	1780［181］	2.80
2.80	—	—	508	75.6	—	49.6	62.7	85.3	68.2	54.5	—	1740［177］	2.80
2.80	—	477	508	75.6	—	49.6	62.7	85.3	68.2	54.5	66	1740［177］	2.80

（续）

布氏压痕直径/mm	布氏硬度 10mm 球负荷 3000kgf		维氏硬度	洛氏硬度（2）				表面洛氏硬度 金刚石 圆锥压头			肖氏硬度	抗拉强度（近似值）/MPa（kgf/mm²）	布氏压痕直径/mm
	标准球	WC 球		A 标尺 60kgf 金刚石 圆锥压头	B 标尺 100kgf 1.6mm 压头	C 标尺 150kgf 金刚石 圆锥压头	D 标尺 100kgf 金刚石 圆锥压头	15-N 标尺 15kgf	30-N 标尺 30kgf	45-N 标尺 15kgf			
2.85	[461]	—	495	75.1	—	48.8	61.9	84.9	67.4	53.5	—	1680 [172]	2.85
2.85	—	—	491	74.9	—	48.5	61.7	84.7	67.2	53.2	—	1670 [170]	2.85
2.85	—	461	491	74.9	—	48.5	61.7	84.7	67.2	53.2	65	1670 [170]	2.85
2.90	[444]	—	474	74.3	—	47.2	61.0	84.1	66.0	51.7	—	1595 [162]	2.90
2.90	—	—	472	74.2	—	47.1	60.8	84.0	66.8	51.5	—	1585 [162]	2.90
2.90	—	444	472	74.2	—	47.1	60.8	84.0	65.8	51.5	63	1585 [162]	2.90
2.95	[429]	429	455	73.4	—	45.7	59.7	83.4	64.6	49.9	61	1510 [154]	2.95
3.00	[415]	415	440	72.8	—	44.5	58.8	82.8	63.5	48.4	59	1460 [149]	3.00
3.05	[401]	401	425	72.0	—	43.1	57.8	82.0	62.3	46.9	58	1390 [142]	3.05
3.10	[388]	388	410	71.4	—	41.8	56.8	81.4	61.1	45.3	56	1330 [136]	3.10
3.15	[375]	375	396	70.6	—	40.4	55.7	80.6	59.9	43.6	54	1270 [129]	3.15
3.20	363	363	383	70.0	—	39.1	54.6	80.0	58.7	42.0	52	1220 [124]	3.20

（续）

布氏压痕直径/mm	布氏硬度 10mm 球负荷 3000kgf		维氏硬度	洛氏硬度（2）				表面洛氏硬度 金刚石　圆锥压头			肖氏硬度	抗拉强度（近似值）/MPa（kgf/mm^2）	布氏压痕直径/mm
	标准球	WC 球		A 标尺 60kgf 金刚石圆锥压头	B 标尺 100kgf 1.6mm 压头	C 标尺 150kgf 金刚石圆锥压头	D 标尺 100kgf 金刚石圆锥压头	15-N 标尺 15kgf	30-N 标尺 30kgf	45-N 标尺 15kgf			
3.25	352	352	372	69.3	(110.0)	37.9	53.8	79.3	57.6	40.5	51	1180 [120]	3.25
3.30	341	341	360	68.7	(109.0)	36.6	52.8	78.6	56.4	39.1	50	1130 [115]	3.30
3.35	331	331	350	68.1	(108.5)	35.5	51.9	78.0	55.4	37.8	48	1095 [1120]	3.35
3.40	321	321	339	67.5	(108.0)	34.3	51.0	77.3	54.3	36.4	47	1060 [108]	3.40
3.45	311	311	328	66.9	(107.5)	33.1	50.0	76.7	53.3	34.4	46	1025 [105]	3.45
3.50	302	302	319	66.3	(107.0)	32.1	49.3	76.1	52.2	33.8	45	1005 [103]	3.50
3.55	293	293	309	65.7	(106.0)	30.9	48.3	75.5	51.2	32.4	43	970 [99]	3.55
3.60	285	285	301	65.3	(105.5)	29.9	47.6	75.0	50.3	31.2	—	950 [97]	3.60
3.65	277	277	292	64.6	(104.5)	28.8	46.7	74.4	49.3	29.9	41	925 [94]	3.65
3.70	269	269	284	64.1	(104.0)	27.6	45.9	73.7	48.3	28.5	40	895 [91]	3.70
3.75	262	262	276	63.6	(103.0)	26.6	45.0	73.1	47.3	27.3	39	875 [89]	3.75
3.80	255	255	269	63.0	(102.0)	25.4	44.2	72.5	46.2	26.0	38	850 [86]	3.80

（续）

布氏压痕直径/mm	布氏硬度 10mm 球负荷 3000kgf		维氏硬度	洛氏硬度（2）				表面洛氏硬度 金刚石　圆锥压头			肖氏硬度	抗拉强度（近似值）/MPa（kgf/mm^2）	布氏压痕直径/mm
	标准球	WC 球		A 标尺 60kgf 金刚石圆锥压头	B 标尺 100kgf 1.6mm 压头	C 标尺 150kgf 金刚石圆锥压头	D 标尺 100kgf 金刚石圆锥压头	15-N 标尺 15kgf	30-N 标尺 30kgf	45-N 标尺 15kgf			
3.85	248	248	261	62.5	(101.0)	24.2	43.2	71.7	45.1	24.5	37	825［84］	3.85
3.90	241	241	253	61.8	100.0	22.8	42.0	70.9	43.9	22.8	36	800［82］	3.90
3.95	235	235	247	61.4	99.0	21.7	41.4	70.3	42.9	21.5	35	785［80］	3.95
4.00	229	229	241	60.8	98.2	20.5	40.5	69.7	41.9	20.1	34	765［78］	4.00
4.05	223	223	234	—	97.3	［18.8］	—	—	—	—	—	—	4.05
4.10	217	217	228	—	96.4	［17.5］	—	—	—	—	33	725［74］	4.10
4.15	212	212	222	—	95.5	［16.0］	—	—	—	—	—	705［72］	4.15
4.20	207	207	218	—	94.6	［15.2］	—	—	—	—	32	690［70］	4.20
4.25	201	201	212	—	93.8	［13.8］	—	—	—	—	31	675［69］	4.25
4.30	197	197	207	—	92.8	［12.7］	—	—	—	—	30	655［67］	4.30
4.35	192	192	202	—	91.9	［11.5］	—	—	—	—	29	640［65］	4.35
4.40	187	187	196	—	90.7	［10.0］	—	—	—	—	—	620［63］	4.40

（续）

布氏压痕直径/mm	布氏硬度 10mm 球负荷 3000kgf		维氏硬度	洛氏硬度（2）				表面洛氏硬度 金刚石 圆锥压头			肖氏硬度	抗拉强度（近似值）/MPa（kgf/mm²）	布氏压痕直径/mm
	标准球	WC 球		A 标尺 60kgf 金刚石圆锥压头	B 标尺 100kgf 1.6mm 压头	C 标尺 150kgf 金刚石圆锥压头	D 标尺 100kgf 金刚石圆锥压头	15-N 标尺 15kgf	30-N 标尺 30kgf	45-N 标尺 15kgf			
4.45	183	183	192	—	90.0	[9.0]	—	—	—	—	28	615 [63]	4.45
4.50	179	179	188	—	89.0	[8.0]	—	—	—	—	27	600 [61]	4.50
4.55	174	174	182	—	87.8	[6.4]	—	—	—	—	—	585 [60]	4.55
4.60	170	170	178	—	86.8	[5.4]	—	—	—	—	26	570 [58]	4.60
4.65	167	167	175	—	86.0	[4.4]	—	—	—	—	—	560 [60]	4.65
4.70	163	163	171	—	85.0	[3.3]	—	—	—	—	25	545 [56]	4.70
4.80	156	156	163	—	82.9	[0.9]	—	—	—	—	—	525 [53]	4.80
4.90	149	149	156	—	80.8	—	—	—	—	—	23	505 [51]	4.90
5.00	143	143	150	—	78.7	—	—	—	—	—	22	490 [50]	5.00
5.10	137	137	143	—	76.4	—	—	—	—	—	21	460 [47]	5.10

（续）

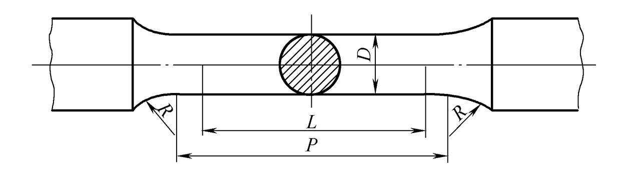
布氏压痕直径/mm	布氏硬度 10mm 球负荷 3000kgf		维氏硬度	洛氏硬度（2）				表面洛氏硬度 金刚石 圆锥压头			肖氏硬度	抗拉强度（近似值）/MPa（kgf/mm²）	布氏压痕直径/mm
	标准球	WC 球		A 标尺 60kgf 金刚石圆锥压头	B 标尺 100kgf 1.6mm 压头	C 标尺 150kgf 金刚石圆锥压头	D 标尺 100kgf 金刚石圆锥压头	15-N 标尺 15kgf	30-N 标尺 30kgf	45-N 标尺 15kgf			
5.20	131	131	137	—	74.0	—	—	—	—	—	—	450［46］	5.20
5.30	126	126	132	—	72.0	—	—	—	—	—	20	435［44］	5.30
5.40	121	121	127	—	69.8	—	—	—	—	—	19	415［42］	5.40
5.50	116	116	122	—	67.6	—	—	—	—	—	18	400［41］	5.50
5.60	111	111	117	—	65.7	—	—	—	—	—	15	385［39］	5.60

注：1. 该表基本上是 AMS《Metals Hand book》第八版第一卷表中的对应内容。为方便起见，对拉伸强度近似值追加了等价度量单位及超出推荐范围的布氏硬度。

2. 括号（）所示单位及数值是根据 JISZ8413 及 Z8438 换算表，由 psi 换算而来的。其中 $1MPa = 1N/mm^2$。

3. 表中括号［］内的数字，不是常用范围，仅供参考。

4. 1kgf = 9.80665N。



(单位: mm)

直径	标距长度	平行长度	过渡半径
D	*L*	*P*	*R*
14	50	60	>15

图 6-11　JIS4 号试样的拉伸试样示意图

另外，当工模具钢处于超过 50HRC 的高硬度范围时，为防止源自螺纹孔的开裂还可以使用特殊试样。

3. 弯曲试验（JIS Z 2248）[17]

JIS Z 2248 所规定的弯曲试验是将各种截面形状的试样，在规定的弯曲半径内，以一定的试验力方向弯曲至规定角度，然后检查弯曲部位是否有裂伤及其他损伤的方法。

从根本上来说 JIS Z 2248 所规定的弯曲试验是用于测定材料的应变能。而工模具钢的弯曲试验是为了测定对应弯曲应力的弯曲强度（抗弯强度）与达到断裂时的挠曲量，因此所用方法不同。一般对圆筒或矩形截面的试样，采用两个支撑点和一个加载点的三点弯曲试验法。

4. 冲击试验（JIS Z 2242）[18]

冲击试验在 JIS Z 2242 中作为金属材料的夏比冲击试验方法得到规定。冲击试验是用图 6-12 所示的试验机将试样冲断后，利用所耗能量来求得冲击韧度的试验。就工模具钢而言，对退火材料及热作模具钢等韧性较高的材料，使用 3 号试样（U 型缺口）或 4 号试样（V 型缺口）。对冷作模具钢和高速工具钢等高硬度材料，JIS 中没有规定，一般使用缺口形状较为缓和的 10R 的 C 型缺口试样等。

试样的尺寸均为 10mm × 10mm × 55mm。将这些试样装载到 40mm

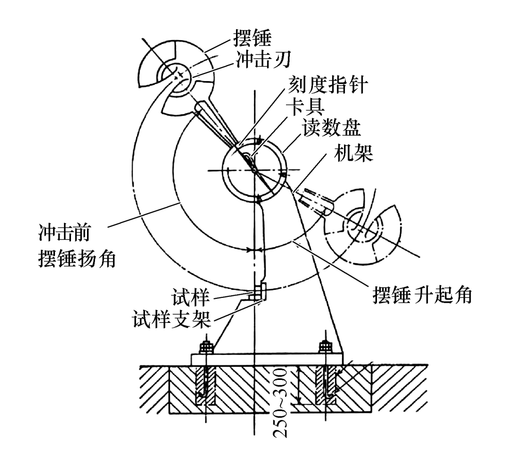


图 6-12　夏比冲击试验机

间隔的试样架上，从缺口背面用摆锤一次性击断。摆锤落下后会因反作用而反向上摆。初期和冲击断裂后的上摆量势能差即为断裂吸收能量。

冲击韧度的计算方法如下：

冲击韧度（J/cm^2）= 冲击吸收能量 J/缺口部位的原始截面积 cm^2

此外，还有通过断口观察、测量脆性断口面积比及试样宽度膨胀量（横胀量）等来进行评定的方法。

另外，还可以进一步通过改变试验温度来进行冲击试验，作出冲击吸收能量及脆性断口面积比与试验温度的关系曲线。这里把脆性断口面积比达 50% 的试验温度叫做脆性转变温度。该转变温度越低，则表示韧性越高。脆性—延展性转变温度曲线如图 6-13所示。

6. 7. 4　无损检测

用于工模具钢的无损检测试验有渗透探伤试验、磁粉探伤试验及超声波探伤试验。

1. 渗透探伤试验

常用的渗透探伤试验为着色渗透探伤或叫做红液渗透探伤。将探

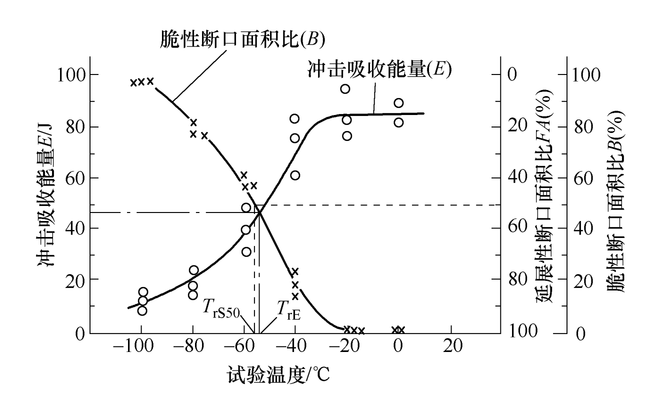


图 6-13　脆性—延展性转变温度曲线

伤表面脱脂清洗后涂敷渗透液，保持 10 ~ 30min 后清除表面渗透液，然后喷上显影液，使渗入缺陷位置的渗透液显现出来。另外，还有需在暗室用紫外线进行观察的荧光渗透探伤方法。这类试验可检测出表面有开口的缺陷，如皱纹、气孔等。

2. 磁粉探伤试验

这是将钢材磁化后，利用其表面吸附磁粉的分布形态来检测表面开裂及损伤的方法。作为工模具钢制造过程中缺陷的检验方法，有轴向直接通电的轴向通电法、与轴向成直角方向通电的直角通电法等磁化方法。磁粉所用材料为纯铁粉。有将磁粉直接喷撒到探伤对象上的干式法以及加水混合成磁悬液后将探伤对象浸入的湿式法。磁粉会集积到开裂或损伤部位。

3. 超声波探伤试验（JIS Z 2344）[19]

JIS Z 2344 中规定了利用金属材料脉冲反射法的超声波探伤试验方法通则。这是向材料中入射超声波，通过观察其反射波及其衰减状况来检测内部缺陷的无损检测方法。超声波的入射方法有垂直法、斜角法及水中入射的水浸法。

其设备由超声波振荡装置、向探伤对象入射超声波的探头（水晶体）、观察反射波形的显示器、数码装置等构成。

参 考 文 献

[1] 大同特殊鋼（株）：特殊鋼ハンドブック（1999），p16
[2] 小澤正俊，中山傑，新貝元：電気製鋼，vol. 55（1984），No. 2，p93
[3] 岸田壽夫：ふぇらむ，Vol. 4（1999），No. 8，p548
[4] 大同特殊鋼（株）：カタログ，粉末の製造法
[5] 田部博輔：型技術，Vol. 18（2003），No. 10，p106
[6] JISハンドブック①鉄鋼Ⅰ，日本規格協会（2006），p570
[7] JISハンドブック①鉄鋼Ⅰ，日本規格協会（2006），p572
[8] JISハンドブック①鉄鋼Ⅰ，日本規格協会（2006），p650
[9] JISハンドブック①鉄鋼Ⅰ，日本規格協会（2006），p657
[10] JISハンドブック①鉄鋼Ⅰ，日本規格協会（2006），p619
[11] JISハンドブック①鉄鋼Ⅰ，日本規格協会（2006），p286
[12] JISハンドブック①鉄鋼Ⅰ，日本規格協会（2006），p299
[13] JISハンドブック①鉄鋼Ⅰ，日本規格協会（2006），p401
[14] JISハンドブック①鉄鋼Ⅰ，日本規格協会（2006），p417
[15] 大同特殊鋼（株）：特殊鋼ハンドブック（1999），p471
[16] JISハンドブック①鉄鋼Ⅰ，日本規格協会（2006），p269
[17] JISハンドブック①鉄鋼Ⅰ，日本規格協会（2006），p267
[18] JISハンドブック①鉄鋼Ⅰ，日本規格協会（2006），p274
[19] JISハンドブック①鉄鋼Ⅰ，日本規格協会（2006），p473

专栏 7

埃菲尔铁塔是用钢建成的吗?

19 世纪的巴黎举行过五次世界博览会。其中 1889 年的那一次，为纪念法国独立 100 周年，兴建了埃菲尔铁塔。设计者是居斯塔夫・埃菲尔。据说他对塔支脚的曲线美很是刻意追求。当时使用材料需要从钢和锻铁中选择，结果是锻铁由于成本为钢的 2/3 而得到采用。

锻铁强度比钢要低，所以不得不相应地加大构件截面积。如今观其雄姿，支脚的稳定感显现出庄重威严的风貌，令人领会到使用锻铁的重要性。

从 1887 至 1889 年，埃菲尔铁塔历时三年完成，总共使用了 7000t 锻铁，制成 15000 个构件，用 250 万个铆钉固定而成。相比之下，采用高强度钢的东京塔，其总质量是 4000t。

在设计之初，埃菲尔铁塔曾被巴黎知识分子说三道四。不过随着铁塔的建成，人们逐渐对她开始抱有好感，纷纷予以称赞，如今已被视为巴黎的象征。尽管当时已是钢铁生产不成问题的年代，但设计师还是特意选用了锻铁，为铁塔增添了美感。独具慧眼的设计师如今依旧令人钦佩。

第7章 模具材料的今后

模具材料中使用最多的工模具钢，从其合金组成种类之多，性能与热处理密不可分的特点来看，称之为特殊钢中的特殊钢也不为过。

将这一重要材料运用得更好、更广，并进一步开拓新材料及应用技术应是材料技术工作者的职责。

在最后一章，将就今后模具材料的发展方向及其材料技术工作者的努力方向加以综述。

在前面的章节中，从何谓模具的提问开始，到模具材料的历史及模具材料的所需性能，后来又对模具材料的整体概况进行了介绍，之后对赋予模具材料活力的热处理基础知识进行了学习，并简单地介绍了一些模具材料的制造方法。

在最后的一章，将概括地就模具材料今后的课题以及攻克这些课题的技术工作者的努力方向加以介绍。

7.1　今后对模具材料的期待

什么是好模具？模具是“用金属制成的成形模，通过冲压、锻造、铸造等来反复生产同类产品的工具”。因此，为制造出同样的产品，要求模具不仅在同一批量内，即使在不同批量之间的品质也要达到稳定一致。

还有，成形对象的材料也在不断地进步和发展，为进一步提高生产率，势必对模具的要求会更加严格。为降低产品成本，对模具材料也会有更高要求。材料向低价位的转变实际上意味着对该材料的特性要求更加苛刻，等于要求有更高的品质。

为方便制造出更优质的模具，特将模具各加工阶段材料的技术课题列出，如图 7-1 所示。

在从设计到材料采购的初期，用户对适合的模具材料的采购便利性最为关注。因此，不但要为满足特性需求研发新材料，而且便于选择模具材料的材料数据库及模具材料选用手册的开发也显得十分重要。

就粗加工、热处理、精加工的工艺过程来说，主要是解决机械加工性和热处理性高度化的问题，也就是要使切削加工更加容易，花费工时和费用更少，以及使热处理更加容易等。另一方面，模具材料的高强度化和高品质化又使其切削加工性趋于下降。因此，需要在不降低特性的前提下，添加易切削元素或改善主要成分和微观组织来保持切削性不下降。基本上来说，追求高性能即会朝高合金化和高纯净化方向发展，难免会出现切削性恶化的倾向。这一相互对立的双方同时提高永远是需要攻克的课题。



图 7-1　模具各加工阶段材料的技术课题

其中，高速化和高刚性化等切削设备的进步，以及刀具材料和表面镀层相配合而使难切削材料变得容易切削等，都说明了需要与加工设备和切削刀具厂家更加紧密合作。同时，也应从模具材料的角度对切削加工和电火花加工最佳条件进行探索，所以需要不断加深对关联加工技术的研究。

对热处理的要求也更加严格。以往只需实现硬度要求，现在逐渐转向通过模具材料和热处理的配套来保证实际使用中的力学性能。可认为硬度和允许变形的范围会越发窄小，即高精度热处理的推广会得到促进，与热处理相配合的表面改性技术的重要性也会显得更高。满足所需要求的镀层与配合度好的模具材料相组合而形成的复合表面处理技术，有可能满足多种需求。

另一方面，加工设备和切削刀具的进步，使得硬度为 60HRC 的材料切削加工已成为可能。不过需要平衡好切削加工效率降低及加工费用增加的弊端与省略热处理和缩短工期的优势之间的关系。

最后在模具使用当中，可通过模具使用方和模具材料生产厂家共同掌握模具损伤形式和寿命的情况来提高研发速度，相互配合可提高模拟精度，缩短试制周期。

总而言之，只有模具材料生产厂家、加工机械生产厂家、刀具生产厂家、模具加工厂家、热处理厂家和用户更加紧密地合作，模具材料才能得到更好的发展。

7.2　全球化发展[1~3]

以汽车生产厂家和家电生产厂家为中心，其相关企业和模具厂家不断将生产地转移到东南亚和中国。转移到国外生产兴起于欧美国家的企业，最初是为了回避贸易摩擦和关税壁垒，后来，企业为削减生产成本，在东南亚国家生产和采购的情况逐渐增加。现在，东亚经济圈的 GDP 总合已与北美及欧洲比肩，呈现出三极结构。中国的 GDP 已经超过日本跃居世界第二。东南亚国家虽然于 1997 年出现了金融危机，但其经济顺利回复并持续增长。泰国已成为汽车零部件的生产

和出口大国。

在这一背景下，将生产地按国内国外划分已经没有现实意义，还是涵括国内外的全球化发展设想比较合时宜。面对日系用户和模具企业的国外生产现状，将从模具材料角度考虑的全球化发展设想归纳如下：

① 按照与国内同样的服务水平，来提供令用户满意的模具材料。

② 提供具有特色的品牌钢材。

③ 提供模具材料、加工及热处理的配套服务。

④ 为进一步提高模具材料应用效果而提供技术服务。

在中国和韩国，一些比较普通的材料虽然还未达到与日本相同的水平，但已经拥有较为相近的制造技术，并有价格优势。不过，正如本书第 4 章所提到的那样，对模具材料来说，即使是称为 JIS 钢的各种品牌钢，也在成分和性能上各具特色。品牌之所以能树立起来，是用户长期支持的结果。因此，向用户提供其他国家或厂家达不到的高性能、高质量的品牌钢，使用户能放心地用于制作模具，是模具材料生产厂家的使命，这一点是要始终牢记的。

同时，为了充分发挥模具材料的功能，还需要提供有关完善热处理及模具材料应用的各种知识和技巧。为此，模具材料生产厂家在当地营销网点还需设有热处理工厂，用于提高配套服务。

在这种情况下，企业一方面需要进一步谋求与国外模具材料的差异化，另一方面又不得不对国外企业提供热处理技术和使用技术的指导。这初看起来是相互矛盾的，但这种双向对应，正是模具材料技术工作者为促进优良模具达到稳定生产要求而应担负的责任。

7.3　模具材料与材料技术工作者

作为模具材料的工模具钢，称其为特殊钢中的特殊钢毫不为过，这一点已在模具材料的发展历史及模具材料的章节中作过说明。

在特殊钢的定义中，主要内容是“含有合金元素”及“经热处理后使用”。工模具钢的用途广泛，从碳素钢到低合金钢、高合金钢、

高硬度不锈钢到析出硬化钢，包括许多钢种群。为满足多种性能要求，工模具钢添加了多种合金元素，同时为了进一步发挥其功能而几乎都要进行热处理。其中有均匀化退火、正火、球化退火、淬火、回火、固溶处理和时效处理等。

将所有特殊钢的特点集于一身的最优秀的特殊钢是工模具钢。特殊钢的语源是由德语 Edelstahl（高贵的钢）而来的。工模具钢中所用的合金元素涉及地球上的稀有金属，尤其当原料价格暴涨问题时，更可以称之为贵重、高贵的钢。竭尽全力将这些贵重材料用得更好是材料技术工作者的使命。

考虑到全球化发展，今后向追赶日本的国家也需要公开技术资料进行教育培养，这是需要面对的现实。将技术和知识据为己有发挥不了什么作用，反之，通过技术推广才能使其得到确立，从而获得普及[4]。到头来，这些内容早晚会变得一般化、陈旧化，即使这样也要通过反复研发领先的新材料和新技术，来不断实现技术水平的差异化，这是材料技术工作者的职责。

技术不同于纯理论科学，而属于应用科学。特别是模具技术工作者及材料技术工作者，本身就具有工匠素质，因此不经反复尝试摸索便不能进步。从这个意义上来说，超越材料制造者和用户关系的相互努力和合作，对开拓未来至关重要。

参考文献

[1] 日原政彦：型技術，vol. 20（2005），No. 13，p14
[2] 並木邦夫：型技術，vol. 20（2005），No. 13，p23
[3] 福田正弘，浜小路正博：型技術，vol. （2005），No. 13，p28
[4] フォーブス：技術の歴史，岩波書店（1964）

附录　工具钢钢号近似对照表[1,2,3]

附表 1　碳素工具钢钢号对照表

日本 JIS	国际标准化组织 ISO	中国 GB	韩国 KS	美国 ASTM	欧洲 EN	德国 DIN	德国 W-Nr.	英国 BS	法国 NF	俄罗斯 Gost	瑞典 SS	意大利 UNI
SK140（SK1*）	TC140	T13	STC1	—	—	C13W2	1.1673	—	~C140E3U	У13	—	C140KU
SK120（SK2*）	TC120	T12	STC2	W1A-11½	CT120	C125W2	1.1663	BW1C	C120E3U	У12	1885	C120KU
SK105（SK3*）	~TC105	T11	STC3	W1A-10½	~CT105	C110W2	1.1654		~C105E2U	У11	—	—
SK95（SK4*）	TC105	T10	STC4	W1A-9½	—	C105W2	1.1645	BW1B	(C105E2U)	У10	1880	C100KU
SK90	TC90	T9	—	W1A-8½	~CT90	—	—	—	C90E2U	У9	—	C90KU
SK85（SK5*）	—	T8Mn	STC5	—	—	C85WS	1.1830	—	—	У8Г	—	—
SK80	TC80	T8	—	W1A-8	~CT80	C80W2	1.1625	—	(C80E2U)	У8	1778	C80KU
SK75（SK6*）	—	—	STC6	—	—	C80W1	—	—	—	—	—	—
SK70	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
SK65（SK7*）	TC70	T7	STC7	—	~CT70	C70W2	1.1620	—	(C70E2U)	У7	1770	C70KU
SK60	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

注：带“*”的为日本旧的钢号。

附表 2　高速工具钢钢号对照表

日本 JIS	国际标准化组织 ISO	中国 GB	韩国 KS	美国 ASTM	德国		英国 BS	法国 NF	俄罗斯 Gost	瑞典 SS
					DIN	W-Nr.				
SKH2	HS18-0-1	W18Cr4V	SKH2	T1	S18-0-1	1.3355	BT1	HS18-0-1	P18	2750
SKH3	HS18-1-1-5	W18Cr4VCo5	SKH3	T4	S18-1-2-5	1.3255	BT4	HS18-1-1-5	~P18 K5Φ2	2754
SKH4	HS18-0-1-10	W18Cr4V2Co8	SKH4	T5	S18-1-2	1.3265	BT5	HS18-0-1-10	—	2756
SKH10	HS12-1-5-5	W12Cr4V5Co5	SKH10	T15	S12-1-4-5	1.3202	BT15	HS12-1-5-5	P10K5Φ5	—
SKH40	—	—	SKH40	—	—	—	—	—	—	—
SKH50	—	—	SKH50	—	—	—	—	—	—	—
SKH51	HS6-5-2	W6Mo5Cr4V2	SKH51	M2	S6-5-2	—	BM2	HS6-5-2	—	—
SKH52	—	W6Mo5Cr4V3	SKH52	M3-1	—	—	—	—	P6M5Φ3	—
SKH53	HS6-5-3	CW6Mo5Cr4V3	SKH53	M3-2	S6-5-3	1.3344	—	HS6-5-3	—	2725
SKH54	—	—	SKH54	M4	—	—	BM4	—	—	—
SKH55	HS6-5-2-5	W6Mo5Cr4V2Co5	SKH55	—	S6-5-2-5	1.3243	BM35	HS6-5-2-5	P6M5K5	2723
SKH56	—	—	SKH56	M36	—	—	—	—	—	—
SKH57	HS10-4-3-10	—	SKH57	—	S10-4-3-10	1.3207	BT42	HS10-4-3-10	—	—
SKH58	HS2-9-2	W2Mo9Cr4V2	SKH58	M7	—	—	—	HS2-9-2	—	—
SKH59	HS2-9-1-8	W2Mo9Cr4VCo8	SKH59	M42	S2-10-1-8	1.3247	BM42	HS2-9-1-8	—	2716

附表 3　合金工具钢钢号对照表

日本 JIS	国际标准化组织 ISO	中国 GB	韩国 KS	美国 ASTM	欧洲 EN	德国 DIN	德国 W-Nr.	英国 BS	法国 NF	俄罗斯 Gost	瑞典 SS	意大利 UNI
SKS11	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
SKS2	105WCr1	—	—	—	—	105WCr6	—	—	—	—	—	—
SKS21	—	W	STS21	F1	—	120W4	1.2414	BF1	—	B1	2705	—
SKS5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
SKS51	—	—	—	L6	—	—	—	—	—	—	—	—
SKS7	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
SKS81	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
SKS8	—	Cr06	STS8	—	—	140Cr3	1.2008	—	130Cr3	X05	—	—
SKS4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
SKS41	—	4CrW2Si	—	—	—	—	—	—	—	4XB2C	—	—
SKS43	TCV105	—	—	W2-9 1/2	—	—	—	BW2	—	—	—	—
SKS44	—	—	—	W2-8	—	—	—	—	—	—	—	—
SKS3	95MnWCr1	9CrWMn	STS3	O1	95MnWCr5	100MnCrW4	1.2510	BO1	90MnWCrV5	9XBΓ	2140	95MnWCr5KU
SKS31	105WCr1	CrWMn	STS31	—	107WCr5	105WCr6	1.2419	—	105WCr5	XBΓ	—	107WCr5KU
SKS93	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
SKS94	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
SKS95	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

（续）

日本 JIS	国际标准化组织 ISO	中国 GB	韩国 KS	美国 ASTM	欧洲 EN	德国		英国 BS	法国 NF	俄罗斯 Gost	瑞典 SS	意大利 UNI
						DIN	W-Nr.					
SKD1	210Cr12	Cr12	STD1	D3	X210Cr12	X210Cr12	1.2080	BD3	X200Cr12	X12	—	X205Cr12KU
SKD2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
SKD10	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
SKD11	—	Cr12MoV	STD11	—	X160CrMoV12-1	X155 CrMoV12	1.2601	—	—	X12M	2310	—
SKD12	100CrMoV5	Cr5Mo1V	STD12	A2	X100CrMoV5-1	X100CrMoV5-1	1.2363	BA2	X100CrMoV5	—	2260	X100CrMoV5-1KU
SKD4	30WCrV5	—	STD4	—	X30WCrV5-3	X30WCrV5-3	1.2567	—	X32WCrV5	—	—	X30WCrV5-3KU
SKD5	30WCrV9	3Cr2W8V	STD5	H21	X30WCrV9-3	X30WCrV9-3	1.2581	BH21	X30WCrV9	3X2B8Ф	2730	X30WCrV9-3KU
SKD6	35CrMoV5	4Cr5MoSiV	STD6	H11	X37CrMoV5-1	X38CrMoV5-1	1.2343	BH11	X38CrMoV5	4X5MФC	—	X37CrMoV5-1KU
SKD61	40CrMoV5	4Cr5MoSiV1	STD61	H13	X40CrMoV5-1-1	X40CrMoV51	1.2344	BH13	X40CrMoV5	4X5MФ1C	—	X40CrMoV5-1-1KU
SKD62	—	4Cr5W2VSi	STD62	H12		X37CrMoW5-1	1.2606	BH12	X35CrWMoV5	—	—	—
SKD7	30CrMoV3	—	—	H10	—	X32CrMoV33	—	BH10	—	—	—	—
SKD8	—	—	—	H19	—	—	—	BH19	—	—	—	—
SKT3	—	5CrMnMo	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
SKT4	55NiCrMoV2	5CrNiMo	STF4	L6	55NiCrMoV7	55CrNiMoV6	1.2713	BH2 24/5	55NiCrMoV7	5XHM	~2550	55NiCrMoV7KU
SDK6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

参 考 文 献

［1］殿村　剛志：特殊鋼，Vol. 62（2013），No. 3，p42

［2］林慧国，林钢，吴静雯．袖珍世界钢号手册［M］．北京：机械工业出版社．

［3］许进，陈再枝，林慧国，火树鹏，马绍弥．模具材料应用手册［M］．北京：机械工业出版社．

北京市版权局著作权合同登记：图字 01-2013-7583 号

图书在版编目（CIP）数据

模具材料性能与应用/［日］並木　邦夫著；高娟译. —北京：机械工业出版社，2014.3（2018.1 重印）
（日本经典技能系列丛书）
ISBN 978-7-111-45810-4

Ⅰ.①模…　Ⅱ.①並…　②高…　Ⅲ.①模具－材料　Ⅳ.①TG76

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2014）第 026050 号

机械工业出版社（北京市百万庄大街 22 号　邮政编码 100037）
策划编辑：赵磊磊　责任编辑：赵磊磊　宋亚东
版式设计：霍永明　责任校对：佟瑞鑫
封面设计：张　静　责任印制：李　飞
北京云浩印刷有限责任公司印刷
2018 年 1 月第 1 版第 3 次印刷
140mm×203mm・7 印张・194 千字
5001—6500 册
标准书号：ISBN 978-7-111-45810-4
定价：29.80 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

电话服务　　网络服务
服务咨询热线：010-88361066　　机 工 官 网：www.cmpbook.com
读者购书热线：010-68326294　　机 工 官 博：weibo.com/cmp1952
010-88379203　　金 书 网：www.golden-book.com
封面无防伪标均为盗版　　教育服务网：www.cmpedu.com

並木 邦夫

金属材料工学博士，毕业于日本东北大学，曾就职于大同特殊钢株式会社。2003年起担任日本特殊钢行业期刊《特殊钢》杂志的编辑委员长。他的主要研究内容有工模具钢、机械结构钢、表面硬化处理等，在大同特殊钢株式会社曾担任生产技术室长、工具钢技术开发部长、理事，现为大同特殊钢株式会社顾问。並木先生现在仍然活跃在工模具钢技术服务的第一线，还经常为欧美、东南亚和中国的用户、经销商、员工等进行培训，深受好评。



THE FUNCTION AND APPLICATION OF MOULD MATERIAL

上架指导 工业技术／机械工程／模具

ISBN 978-7-111-45810-4

策划编辑◎赵磊磊 / 封面设计◎张静

电话服务
社服务中心：010-88361066
销售一部：010-68326294
销售二部：010-88379649
读者购书热线：010-88379203

地址：北京市百万庄大街22号
邮政编码：100037
网络服务
教材网：http://www.cmpedu.com
机工官网：http://www.cmpbook.com
机工官博：http://weibo.com/cmp1952
封面无防伪标均为盗版

ISBN 978-7-111-45810-4



定价：29.80元